

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ
«НАУЧНО-БИОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА»
И ИСТОРИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ
ИНСТИТУТА ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ РАН
ПО РАЗРАБОТКЕ НАУЧНЫХ БИОГРАФИЙ ДЕЯТЕЛЕЙ
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ:

*А. Т. Григорьян, В. И. Кузнецов, Б. В. Левшин,
З. К. Соколовская (ученый секретарь), В. Н. Сокольский,
Ю. И. Соловьев, И. А. Федосеев (зам. председателя),
А. Л. Янин (председатель), М. Г. Ярошевский*

И. И. Шафрановский, П. Л. Дубов

О г ю с т Б р а в е

1811—1863



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
„НАУКА”
1997**

УДК 92 Браве: „19” 548.0

ББК 22.37г

III 30

Шафрановский И. И., Дубов П. Л. Огюст Браве. —
СПб.: Наука, 1997. 143 с., ил. 5. — (Научно-биографическая
литература).

Книга посвящена жизни и научной деятельности известного французского кристаллографа Огюста Браве, автора знаменитого вывода 14 пространственных решеток, названных его именем. Рассмотрены его научные достижения и прослежены нити, связывающие их с современной кристаллографией. Книга предназначена для широкого круга людей, интересующихся историей кристаллографической науки.

Ответственный редактор

чл.-кор. РАН Г. Б. БОКИЙ

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук Е. П. ОЖИГОВА,
д-р геол.-минер. наук В. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ

Редактор издательства

Т. И. СУШКОВА

Предисловие

Имя замечательного французского ученого Огюста Браве занимает почетное место среди наиболее выдающихся творцов науки о кристаллах. Его достижения являются промежуточным связующим звеном между первой, во многом еще наивной структурной теорией его соотечественника Р. Ж. Гаюи и гениальным завершающим выводом 230 законов симметрии кристаллических структур великого русского кристаллографа Е. С. Федорова. Четырнадцать пространственных решеток Браве, носящих имя их первооткрывателя, лежат в основе всей современной структурной кристаллографии, отвечая группам чистых трансляций.

Предельно простые, строгие и непревзойденные по изяществу определения элементов симметрии — центра, плоскости и осей симметрии, впервые сформулированные Браве, до сих пор почти без изменений фигурируют в учебниках элементарной кристаллографии. Знаменитый закон Браве, связывающий внутреннее строение кристаллов с их внешним строением, и по сей день сохранил всю свою актуальность и жизненность, порождая все новые уточнения и углубления в деталях.

Характеризуя научный подвиг основателя теоретической кристаллографии О. Браве, Е. С. Федоров писал, что перед строгими кабинетными выводами как бы преклонилась природа, и кристаллы расположились в тех системах, которые явились необходимым математическим выводом из понятия о правильных системах точек.

Уже в наше время, расширяя это высказывание, академик Н. В. Белов писал о самом Е. С. Федорове: «Своим выводом 230 пространственных групп симмет-

рии он (Федоров, — *И. Ш., П. Д.*) заложил прочный фундамент — „разграфил“ единственным образом кристаллографический „дисконтинуум“ — то пространство, в котором обязаны располагаться структуры вообще. . .». * Эти два столь сходных высказывания двух выдающихся кристаллографов об их великих предшественниках наглядно показывают последовательность развития кристаллографической теории, ведущая роль в которой принадлежит О. Браве и его продолжателю Е. С. Федорову.

* Белов Н. В. Великий русский кристаллограф и его детище // Федоров Е. С. Симметрия и структура кристаллов. М.; Л., 1949, с. 582.

Глава 1.

Эпоха. Семья. Детство *

Огюст Браве родился 23 августа 1811 г. в местечке Анноней, находящемся на юге Франции, близ Лиона (точнее — Виладон лез Анноне, департамент Ардеш), в семье врача, пользовавшегося любовью и уважением своих сограждан.

Его отец, родившийся в 1764 г., был родом из соседнего городка Сен-Перей. Стремление к образованию привело его на естественный факультет университета в Монпелье, где он впоследствии работал препаратором и там же в 1790 г. получил степень доктора медицины. В 1791 и 1792 гг. доктор Браве безуспешно пытался попасть в качестве врача в состав экспедиции Б. Д. Антриасто, отправляемой на поиск Ж. Ф. Лаперуза. **Эту попытку он мотивировал не только своими немалыми познаниями в естествознании вообще и в медицине в частности, но и стремлением увидеть мир.

Внешние обстоятельства, огромный конкурс желавших участвовать в экспедиции, да и сопротивление семьи помешали доктору Браве осуществить это путе-

* В основу биографических глав положена книга: *Beaumont M. Elie-de. Éloge historique d'Auguste Bravais. Memoires de l'Académie des sciences de l'Institut Impérial de France. T. 35. Paris, 1866, p. 23—49.*

** Жан Франсуа Лаперуз, известный мореплаватель, в 1785—1788 гг. возглавлял кругосветную экспедицию на судах «Буссоль» и «Астролябия» с целью исследования неизвестных частей Тихого океана. Из Порт-Джексона (Австралия) было получено его последнее донесение. Далее, несмотря на плохое состояние кораблей и экипажа, они отплыли к Новой Каледонии (ныне Новая Зеландия). Поисковая экспедиция в 1791—1793 гг., в состав которой так хотел попасть доктор Браве, следов Лаперуза не обнаружила. Только в 1826 г. ирландский мореплаватель П. Диллон и в 1828 г. француз Д. Дюмон-Дюрвиль обнаружили останки потерпевшей крушение экспедиции.

шествование. Любовь к естествознанию вообще и к ботанике в особенности сыграли большую роль позже, когда во время долгих пешеходных прогулок со своими детьми он рассказывал им о природе и сумел привить своим сыновьям стремление к постижению ее тайн. Не случайно сорок лет спустя его младший сын Огюст Браве говорил, что систему Карла Линнея он знал раньше теоремы Пифагора.

В конце 90-х годов XVIII в. доктор Браве обосновался, и уже на всю жизнь, в маленьком городке Анноней, живописно расположенном у входа в одно из горных ущелий Виваре. Здесь и увидел свет герой нашего повествования. На многочисленных горных речушках по всей округе еще прадедами и дедами были построены водяные мельницы для перемалывания тряпья. Городок славился своими бумажными фабриками, и плотные листы желтоватой и голубоватой бумаги с выдавленными водяными знаками расходились отсюда по всей Франции. Местные жители гордились тем, что «ни одно великое событие в истории Франции не обходилось без их участия». И, пожалуй, они были правы: ведь ни одно крупное событие, от декретов Конвента до победных реляций Наполеона, не обходилось без бумаги. Городок был славен еще и тем, что в нем родились знаменитые братья Жозеф и Этьен Монгольфье.

История братьев Монгольфье и их семьи всегда служила предметом восхищения местных жителей. В самом деле, их далекий предок, участвуя в крестовых походах, попал в плен. В Дамаске он освоил, по-видимому не совсем добровольно, неизвестную тогда в Европе технологию выделки бумаги. Сбежав из неволи и вернувшись на родину, он становится владельцем первой во Франции бумагоделательной мануфактуры. Его потомок Пьер Монгольфье был отцом четырнадцати отпрысков обоих полов. Двенадцатый Эжен и тринадцатый Этьен оставили неизгладимый след в истории воздухоплавания. 5 июня 1783 г. в присутствии «местных сословий» братья Монгольфье публично продемонстрировали свое изобретение. Они построили, а точнее сшили, аэростат из холста и оклеили его бумагой, наполнив горячим воздухом. В сентябре того же года в Париже в воздух сначала были подняты животные (гусь, баран, петух), а в ноябре на воздушном шаре

впервые во Франции совершили полет люди. * И сегодня, кстати, монгольфьеры, т. е. шары, наполняемые горячим воздухом, опять начинают пользоваться популярностью среди спортсменов, и увлечение это приобретает международный характер.

Итак, в маленьком городке Анноней у доктора Браве довольно быстро появилась обширная клиентура. Он славился как опытный практик и прекрасный человек. В течение сорока лет он выполнял обязанности госпитального врача. Благодаря преданности науке и неустанным трудам и заботам о здоровье сограждан доктор Браве стал одним из самых уважаемых людей города, перед которым были открыты двери всех домов. В самом начале века он женился на девице из старинного рода Томе.

Медицинская практика, заботы о благосостоянии семьи и воспитании детей сочетались с увлечением ботаникой. Изучая флору Севенн и Альп, он состоял в постоянной переписке и обменивался экспонатами почти со всеми знаменитыми ботаниками Парижа и Монпелье. В частности, он получил от своих корреспондентов семена диковинного для Европы того времени георгина, ** и благодаря его стараниям георгины быстро распространились в центре Франции.

Семья доктора Браве стала разрастаться. На свет появилось пятеро детей — четверо сыновей и дочь. Их мать умерла вскоре после рождения дочери. Поэтому ни дочь, ни совсем маленький Огюст, который был младшим из четырех братьев, совсем не помнили ее. Лишь позже отец показал детям ее акварельный портрет, бережно хранимый в особом ящике его рабочего стола. Чувствуя приближение смерти, мать Браве думала только о судьбе своих детей. Зная доброту и заботливость одной из своих служанок, она уговорила ее никогда не покидать сирот. Предсмертная воля матери Браве была выполнена. После смерти хозяйки эта добрая женщина сорок лет прожила в доме доктора Браве, занимаясь воспитанием детей.

* Уже 24 ноября 1783 г. в Петербурге у Эрмитажа был запущен небольшой монгольфьер. Первым воздушным путешественником России стал академик Я. Д. Захаров, поднявшийся на воздушном шаре в Петербурге 30 июня 1804 г.

** Георгины были названы в честь петербургского академика И. И. Георги.

Итак, будущий великий французский кристаллограф Огюст Браве родился в 1811 г. В том же году сто один пушечный залп, эхом отозвавшийся по всей Франции да и почти по всей Европе, ознаменовал рождение римского короля и наследника императорского престола сына Наполеона I Ж. Ф. Бонапарта. Он умер в 1832 г.

2 июля этого же 1832 г. друзья-республиканцы несли гроб с телом на ныне неизвестное общее кладбище. Три тысячи республиканцев слушали выступления, восхвалявшие гражданские доблести их товарища Эвариста Галуа. По меткому выражению Л. Инфельда, он был «избранником богов» — гениальным математиком, родившимся также в 1811 г. в городке Бур-ля-Рен в семье директора школы-интерната при императорском университете.

Все в том же 1811 г. появился на свет Ж. У. Ж. Леверье, великий астроном, учившийся, как и Огюст Браве, в Политехнической школе, хотя и несколько позднее. Академик, директор Парижской обсерватории, Леверье «на кончике пера» открыл еще одну планету Солнечной системы — Нептун.

По случаю рождения Огюста Браве, Эвариста Галуа, Жана Леверье не гремели артиллерийские залпы. Однако время стерло многие имена, некогда известные и могущественные, но память об этих трех французских ученых с годами только крепла в истории кристаллографии, математики, астрономии. Они росли в совершенно различных семьях, были совершенно разными людьми. Жизненные пути их, очевидно, пересекались, но ни тот, ни другой, ни третий не оставили об этом никаких свидетельств.

Вернемся, однако, к нашему герою. В три года маленький Огюст уже умеет читать. В тишине и покое провинциального городка, куда с опозданием доходят все последние новости мировой и европейской жизни, ничто не смущало покоя их семьи. Все главные военные дороги Европы проходили на много севернее. Где-то на равнинах Фландрии и Шампани решались судьбы людей, сорванными голосами полководцы произносили свои крылатые фразы, императоры подписывали декреты о войне, мире, победе или поражении. . . А здесь по-прежнему неумоимо шумели водяные мельницы, по-прежнему крестьяне по вечерам возвращались усталые

с полей и почтительно здоровались с доктором. Только ему все прибавлялось да прибавлялось работ, только все меньше оставалось времени, только все больше новобранцев уходило туда, на север.

В 1812 г. известный 29-й бюллетень Наполеона принес во все уголки Франции весть о разгроме французской армии русскими войсками. В договоре, заключенном союзниками в Фонтенбло 11 апреля 1813 г., было установлено, что Наполеон I получает в пожизненное владение остров Эльбу и французское государство выплачивает ему ежегодно 2 млн франков. Герцогства Парма, Пьяченца и Гвасталла поступают во владение жены Наполеона, австриячки Марии Луизы и ее сына герцога Рейхштадтского. А потоки русских, австрийских и прусских колонн заволокли дороги Европы, от Эльбы к Рейну, от Рейна к Сене.

Именно в это время для маленького Огюста не было большего удовольствия, чем собирать со своей маленькой сестрой красивые цветы, необычные камушки, ярких насекомых. Таковы были их детские игрушки, возбуждавшие любопытство. Вскоре они уже могли сопровождать своих старших братьев в их прогулках, каждый день принося из этих «путешествий» богатый урожай, состоящий из образцов минералов, растений и насекомых. Когда работы было не очень много и пациенты доктора трудились на полях и виноградниках, сам доктор Браве с энтузиазмом руководил этими экскурсиями. Под наблюдением и умным руководством отца и одновременно учителя четверо братьев проходили свою первую школу понимания природы. Его тонкий, наблюдательный и живой ум делал привлекательным объяснение природных явлений. Ссылки на классиков естествознания, особенно почитаем был К. Линней, строгие и одновременно простые пояснения побуждали детей к научным изысканиям. Любовь к отцу, его авторитет еще более возрастали, когда дети видели, с каким уважением приветствовали доктора его пациенты, с которыми они встречались на полях, либо при возвращении домой.

Дома, в кабинете отца начиналось, быть может, самое интересное. На столе по порядку раскладывали дневной улов. И тогда отец вынимал из резного дубового шкафа книги. Украшением библиотеки была безусловно «Естественная история» в 15 томах, написанная

Ж. Л. Л. Бюффоном при участии доктора Л. Добантона и законченная Б. Ласепедом в 1804 г. Затем следовал трехтомник «Французская флора», представляющий собой определитель растений, встречающихся во Франции. Изданное в 1778 г., это руководство было написано великим французским естествоиспытателем, создателем первой теории исторического развития живой природы А. Ламарком. Вот здесь-то доктор поднимал палец и, улыбаясь, говорил: «Так что же скажет по поводу наших находок месье Жан Батист Антуан?». Затем, посмеиваясь и откидываясь в кресле, добавлял: «А может быть, этого растения у него нет?». И далее с наслаждением наблюдал, как старшие, особенно Камилл, горя от нетерпения, перелистывали страницы справочника и разбирали казавшиеся пока еще совершенно непонятными латинские названия.

Когда маленький Огюст научился писать, ему разрешалось нарезать квадратики бумаги и подписывать названия, копируя их из книги. Экспонаты этого семейного гербария, который впоследствии лег в основу местного музея естественной истории, братья Луи, Камилл и Огюст бережно хранили в ящиках, сделанных местным плотником, — пациент доктора Браве был счастлив хоть чем-то отплатить за спасение своей дочери. В последующие годы братья постоянно пополняли коллекцию образцами флоры, которые Огюст, например, присылал из Алжира и северных стран. И сегодня некоторые из них можно увидеть в музее естественной истории города Анноней. Затем наступала очередь насекомых. Здесь неоценимым подспорьем являлся «Трактат о насекомых» Ш. Бонне, изданный в 1745 г., и, разумеется, «Естественная история» Ж. Л. Б. Бюффона. А вот с определением минералов дело обстояло плохо. Хорошей книжки с картинками не было. Четыре тома «Кристаллографии» Ж. Б. Р. Делиля, изданной в 1784 г. и содержащей описание более чем 500 кристаллов, были заполнены непонятными цифрами и таблицами. Почти через 40 лет сам Огюст внесет ясность в эту науку. А пока, сравнивая найденные кристаллы с картинками, только иногда удавалось определить кварц, кальцит, пирит.

Были в библиотеке и другие книги. Если в один из воскресных дней путешествие не удавалось, то доктор вынимал сочинение А. Гумбольдта, написанное совме-

стно с Э. Бонпланом, «Путешествие по тропическим областям Нового Света, совершенное в 1794—1804 гг.». Первые тома этого труда увидели свет в 1807—1815 гг. При этом доктор говорил: «Друзья мои, сегодня мы отправляемся на Амазонку. . . посмотрим, какие приключения нас там ожидают». Иногда за большим столом они читали вслух «Картины природы» А. Гумбольдта (1807 г.) или «Созерцание природы» Ш. Бонне (1764 г.). Позднее, под руководством Луи Браве и при благосклонном внимании отца, Камилл и Огюст приступили к систематическому чтению восьми томов «Введения в систему природы царства растений» (1824—1828 гг.) О. П. Декандоля — швейцарского ботаника, одного из создателей естественной системы растений.

А в это время в империи происходили следующие события. 3 мая 1814 г. Людовик XVIII прибыл в Париж. Вдоль набережных, от Нового моста до собора Парижской богородицы, был выстроен полк гвардии, чтобы скрыть от глаз короля иностранные полки. Год спустя начались 100 дней — последний взлет Наполеона. А потом — белый террор реставрации. 8 июля 1815 г. Людовик XVIII, на этот раз эскортируемый иностранными войсками, занявшими Париж с 4 по 6 июля, совершил свой въезд в Тюильри — скорее как пленник, чем суверен. В мае 1821 г. умер Наполеон Бонапарт. Франция больше никогда не будет угрожать Альбиону.

В 1822 г. была перестроена Политехническая школа. Революционера Монжа сменил католик Коши. В лицее Людовика Великого стали готовить специалистов латыни и греческого. В 1823 г. в лицей был зачислен Эварист Галуа. Туда же позже поступит Огюст Браве.

16 сентября 1824 г. умер последний французский король Людовик XVIII, похороненный у себя на родине. На смену ему пришел Карл X. Уже будучи студентом Политехнической школы, Огюст будет способствовать его падению. Но это все потом. . . А пока мальчики выросли, и отцу было все труднее отвечать на их вопросы. Однако он навсегда привил им огромное уважение к науке. Вот почему дети доктора Браве, следуя каждый своим увлечениям, навсегда сохранили отпечаток воспитания, полученного в семье.

Юный Огюст довольно рано проявил большую склонность к наблюдениям и твердую решимость всеце-

ло отдать себя науке. Еще будучи ребенком, он интересовался всем, что было связано с атмосферными явлениями. Часто видели, как по утрам он выходил на террасу, чтобы наблюдать за небом, ветром, облаками. Внимание мальчика привлекали яркие отблески лучей заходящего солнца на облаках и окружающей природе. Он отмечает неравномерность света, окружающего луну, цвета радуги, световые кольца Солнца. Тогда Огюст еще не подозревал, что спустя многие годы исследования в этой области принесут ему известность.

Из окон отцовского дома на горизонте виднелась довольно высокая гора, служившая для семьи Браве своеобразным барометром. Ее называли «Скалой ветров». На вершине «Скалы» громоздились облака. Даже во время сильной оттепели на ней оставался белоснежный снег, иногда ее окутывал густой туман. Со временем эта гора стала все больше привлекать внимание маленького Огюста. Однажды отец с братьями взяли его с собой, решив сделать очередную прогулку на ее вершину. И с тех пор, несмотря на то, что подъем и спуск занимал не менее 4—5 часов, гора стала для Огюста предметом постоянных наблюдений и частых прогулок. Его старшие братья часто совершали восхождения на гору Пила, которая славилась среди натуралистов, как источник открытий новых видов насекомых и растений. Братья с восторгом рассказывали о великолепном зрелище, когда из-за Монблана солнце поднимается в ярком сиянии своих лучей.

В то время Огюсту не исполнилось еще и 10 лет, но он буквально грезил о подъеме на эту гору. Его не страшили никакие трудности, даже подъем, который длился 5—6 часов. Втихомолку он составил план своего путешествия и однажды утром отправился в поход. Он решил по примеру братьев переночевать на вершине горы и возвратиться на следующий день со столь желанными, никому не известными растениями, камнями, насекомыми. Он поставил себе целью напиток из Жверского источника и увидеть, как солнце поднимается из-за Альп. Таков был этот юный путешественник, которому впоследствии было суждено подняться даже на вершину Монблана. Отсутствие мальчика никого не испугало, так как в семье считали, что он ушел с друзьями, и не предполагали, что ему могли грозить какие-либо опасности. Близкие очень хорошо знали, что ма-

ленький естествоиспытатель неплохо разбирается в сложной топографии ущелья Виваре, где он с легкостью находил наиболее легкую и безопасную дорогу. К счастью, поход юного натуралиста окончился благополучно.

Ранняя склонность к размышлениям над окружающими его природными явлениями привела его на стезю выдающегося естествоиспытателя. Спустя много лет посетители дома его отца вспоминали, как часто они встречали там маленького Огюста, погруженного в глубокую задумчивость. Когда кто-нибудь спрашивал: «Не грустит ли он?», Огюст отвечал смущенно: «Нет, что вы, я думаю!».

Глава 2.

Годы учения

В 14 лет Огюст полностью завершил классическое образование в коллеже Анноней. После долгих колебаний и размышлений отец счел разумным отправить своего сына для дальнейшего образования в Париж. Было решено, что в коллеже Станислава он пройдет класс риторики и философии. Во время учения в коллеже Анноней даровитый мальчик отличался послушанием и скромностью. Эти черты помогли ему и в коллеже Станислава завоевать себе репутацию добросовестного ученика, выполнявшего все уроки и не пропустившего ни одного занятия. Классическое образование помогло ему со временем выработать чистый, ясный и точный стиль — верный признак хорошего образования.

В то время, когда Огюст учился в коллеже Станислава, основное внимание преподавателей было обращено на учеников, преуспевавших в таких предметах как философия, риторика и т. д. Огюст же увлекался точными науками. Несколько книг по математике, которые он припрятал на дне своего сундучка, были для него интереснее и дороже всего. Тайно, по ночам он прочитывал их, решал задачи, а потом писал восторженные письма своему любимому учителю г-ну Рейно, скромному преподавателю аннонейского коллежа, который и раньше занимался с ним по арифметике и геометрии.

Прежде чем говорить о дальнейшем пути Огюста Браве как ученого, необходимо напомнить о той системе образования, которая господствовала в то время во Франции. Основой образования являлась школа второй ступени, приблизительно соответствовавшая десяти классам общеобразовательной школы нашего времени. Для тех, кто хотел и мог продолжать свое образование,

существовали специализированные «классы» с математическим или же философско-филологическим уклоном. Читавшиеся здесь курсы страдали чрезмерно догматическим, схоластическим подходом.

После окончания коллежа Станислава Огюст уже хорошо знал, в чем его настоящее призвание. Ему хотелось как можно глубже проникнуть в чудесный мир математики с ее стройными логическими представлениями и по возможности применить ее в ботанике. Для достижения намеченной цели он стремился поступить в коллеж Людовика Великого, где были специализированные математические классы.

Программа этих классов была до предела насыщена математическими дисциплинами, а кроме того, преподавался специальный курс аналитической геометрии и механики. Математические дисциплины занимали до 16 часов в неделю. Программа этого коллежа соответствовала примерно нашим школам десятилеткам с математическим уклоном. После окончания коллежа надо было сдать ряд очень трудных экзаменов. Успехи оценивались по многобалльной системе. Наивысшего предела, составлявшего 2000 баллов, не достигал никто за всю историю существования коллежа. Непревзойденный результат был достигнут великим французским математиком Ж. Адамаром, получившим на экзаменах 1875 баллов.

Те, кому удавалось успешно пройти все испытания, получали право поступать в высшие технические учебные заведения. Для окончивших коллеж Людовика Великого был большой выбор специализированных школ: Нормальная школа, Школа мостов и дорог (институт путей сообщения), Школа горных инженеров и две военные: военно-инженерная и артиллерийская. Наибольшим престижем обладала Политехническая школа, поэтому в нее автоматически зачислялись те абитуриенты, которые получали максимальное количество баллов. Ежегодный прием составлял 150 человек. Легко себе представить, насколько труден и тернист был путь в ее стены.

Политехническая школа, основанная в 1794 г. Г. Монжем, Г. де Прони, Л. Ж. Лагранжем, является плодом Великой Французской революции. Она пережила Директорию, Консульство, Империю и Реставрацию. Школа постоянно росла, крепла и раз-

вивалась. В ее стенах царил железная дисциплина, всем предписывалось обязательное ношение одинаковой одежды, что резко выделяло ее воспитанников среди остальной массы студентов. В школе культивировалось честолюбие, перспектива блестящей будущности заставляла учеников напрягать все свои силы. Почти все воспитанники школы впоследствии занимали видные государственные должности либо, став учеными, оставляли глубокий след в той или иной области науки.

Срок обучения в Политехнической школе составлял 2 года. В конце каждого года ученики подвергались необычно строгим экзаменам. В течение месяца каждый профессор принимал экзамены по 9 часов в день.

Состав преподавателей был настолько известен в научном мире, а лекции были настолько интересны, что невольно запоминались на всю жизнь. Для преподавания в Политехническую школу приглашали самых выдающихся ученых Франции. Во многом эта традиция сохранилась и по сей день. В то время, когда там учился Огюст Браве, в школе преподавал С. Д. Пуассон — математик, механик, физик, Ж. Б. Ж. Фурье — председатель Совета Политехнической школы, сменивший С. П. Лапласа после его смерти в 1827 г. Математический анализ и геодезию читал академик Д. Ф. Араго с 1809 по 1831 г. Помимо преподавателей, в школе были еще и репетиторы для тех учеников, которые нуждались в дополнительных занятиях. Насколько этому придавалось большое значение, можно судить по тому, что среди репетиторов с 1805 по 1824 г. был А. М. Ампер.

В те времена наибольшее внимание было обращено на изучение математики, при этом к способным ученикам предъявлялись особенно жесткие требования. В школе преподавался «чистый анализ» (дифференциальное и интегральное исчисление) — 216 часов; применение анализа к геометрии — 136 часов (по Г. Монжу); механику — 188 часов; начертательную геометрию — 306 часов; черчение — 350 часов.

Окончившие Политехническую школу студенты еще два года специализировались в различных учебных заведениях, но выбор уже не был свободным. Студент поступал в то учебное заведение, к которому, согласно отметкам в дипломе, он имел наибольшее призвание. В этих специальных школах могли учиться и не окон-

чившие Политехническую школу, но они не пользовались правом гарантированного трудоустройства на государственную службу, тогда как студенты-политехники рассматривались как государственные чиновники и получали определенное денежное вознаграждение.

Основная часть французских ученых в любой области точных и естественных наук, а также крупных инженеров окончила Политехническую школу. Среди выдающихся ученых часто встречаются имена питомцев Политехнической школы. Например, Л. Коши — один из реформаторов анализа, заслуги которого в математике сопоставимы с заслугами Л. Эйлера и К. Ф. Гаусса; Л. Пуансо — инженер, механик, математик, видный геометр (тела Пуансо), широко применявший геометрические методы в исследовании механических и инженерных проблем; С. Д. Пуассон — выдающийся математик и механик, автор более 300 работ, один из реформаторов механики, он также плодотворно работал в математической физике (уравнение Пуассона), теории упругости (константа Пуассона), теории вероятностей (закон Пуассона), теории рядов, дифференциальной геометрии и т. п.; М. Шаль — создатель вычислительной геометрии, построивший синтетическую проективную геометрию, автор «Курса высшей геометрии», один из первых выдающихся историков науки; Д. Ф. Араго — астроном, физик, математик, метеоролог, оказавший значительное влияние на французскую науку: он открыл хроматическую поляризацию света (независимо от Ж. Био, Д. Брюстера), магнетизм вращения, установил связь полярных сияний и магнитных бурь, по его указаниям была измерена скорость света; Ж. Б. Био — физик, исследователь поляризационных свойств веществ (закон Био), электромагнетизма (закон Био—Савара) и т. п., в честь его был назван минерал биотит (черная слюда); О. Ж. Френель — создатель волновой теории света, волновой оптики (линзы, зеркала, бипризмы Френеля), оптики движущихся тел; В. Понселе — автор проективной геометрии, написавший ее в 1813—1815 гг., будучи в плену в России, в г. Саратове. Вернувшись на родину, он с 1848 по 1850 г. был директором Политехнической школы.

Эта блестящая плеяда ученых-политехников сыграла большую роль в реформе всего высшего образования не только во Франции и Европе, но и в России.

Не удивительно, что маленький Огюст, чьи стремления и мечты были направлены к раскрытию необъяснимых тайн природы, уже в 11 лет решил обязательно учиться в Политехнической школе. Еще в период своей учебы в коллеже Анноней под руководством любимого преподавателя математики г-на Рейно и при заботливом внимании отца и старших братьев он внимательно изучил книгу К. Ф. Дешаля «Курс или мир математики». Эта книга, изданная в Лионе в 1690 г., отличалась весьма разнообразным содержанием. В ней приводилось множество сведений по математике, физике, астрономии, астрологии и зодчеству.

Доктор Браве всячески поощрял увлечение своего сына математикой, хотя мечтал о медицинской карьере для него. Безгранично любя Огюста, он не препятствовал ему после окончания коллежа Станислава готовиться для поступления в Политехническую школу. Кроме того, будучи по сути своей человеком консервативным, изрядно уставшим от всех перипетий последних лет, в течение которых над Францией пронеслись две политические бури, отшумели две революции, доктор Браве с удовлетворением относился к внешней стабильности Политехнической школы. Когда Огюст вернулся в Анноней после двух лет, проведенных в коллеже Станислава, отец вновь отдал его на попечение г-на Рейно, для которого юноша стал скорее другом, чем учеником. За один год г-н Рейно прошел с Огюстом всю программу, необходимую для поступления в Политехническую школу. Наконец в 1828 г. юный Браве решился поехать в Ним для сдачи экзаменов. Однако первая попытка оказалась неудачной — он не прошел по конкурсу. К счастью, он попал к великодушному экзаменатору Бурдону, оценившему большие способности Огюста и посоветовавшего ему не падать духом и более серьезно заняться углублением необходимых знаний. Профессор Бурдон с большой теплотой отнесся к Огюсту и долго говорил с его отцом, убедив его в том, что в дальнейшем жизненный путь «несчастливого» кандидата будет несомненно определяться карьерой политехника. С этого момента доктор Браве больше не колебался. В начале учебного года он отпра-

вил Огюста в Париж и поместил его в учебное заведение, считавшееся лучшим учебным заведением для подготовки к экзаменам в Политехническую школу.

Здесь, в стенах коллежа Людовика Великого, в первый и последний раз пересеклись пути Огюста Браве и Эвариста Галуа. Браве прослушал курс математики у Делиля, а Галуа — у Ришара.

Привычка к самодисциплине и безоговорочному подчинению правилам школьного распорядка помогли Огюсту избежать те осложнения, которыми была чревата трагическая жизнь Эвариста. Здесь уместно привести яркую характеристику Галуа, данную Ф. Клейном: «Неслыханно ранняя зрелость в соединении с неукротимым темпераментом, который не мог подчиниться никаким правилам, страстность натуры, разрушающей самое себя, делают Галуа типичным представителем неупорядоченного, чисто французского гения».*

Галуа и Браве были настолько разными людьми, что даже учебник А. М. Лежандра «Начала геометрии», изданный в 1794 г., они читали и поняли по-разному. В этом учебнике в отличие от «Начал» Эвклида просматривались два подхода к геометрии — алгебраический и арифметический и впервые в практике преподавания математики были использованы начальные понятия о симметрии. Огюст в результате увидел симметрию (геометрическую кристаллографию), Эварист — алгебру (теорию групп).

В 1829 г. они окончили коллеж Людовика Великого. Вот что писал по этому поводу Л. Инфельд: «На классном конкурсе Эварист Галуа, как все того и ожидали, получил по математике первую премию. Месье Ришар надеялся, что Галуа займет первое место и на общем конкурсе. Это означало бы и право поступить без экзаменов в Политехническую школу. Галуа занял только пятое место. Экзаменационная задача была не очень трудной, и некоторые ученики представили великолепные решения. Решение Эвариста Галуа было слишком кратким, рассуждения — сжатыми. Победу одержал другой ученик. Им был О. Браве». ** Так в конце года

* Клейн Ф. Лекции о развитии математики в XIX столетии. Ч. I. М.; Л., 1937.

** Инфельд Л. Эварист Галуа. Париж, 1965, с. 117.

на общем конкурсе Огюст получил первую премию по математике и был принят вторым в Политехническую школу.

В феврале 1830 г. Э. Галуа был принят в Подготовительную школу, открытую в 1826 г. вместо Нормальной школы, закрытой в 1822 г. В ночь на 28 июля 1830 г. 25 студентов Подготовительной школы ворвались в зал для фехтования, расхватили рапиры и, наточив их о каменные плиты пола, с криком: «Долой Бурбонов, да здравствует свобода» вырвались из школы на улицу Монтань-Сен-Женевьев. Если бы Эварист Галуа не был силой удержан в стенах школы, возможно, пути Огюста Браве и Эвариста Галуа пересеклись бы вновь там, где разгорелась борьба. К великому сожалению, после революции 1830 г. их пути разошлись навсегда. 22 октября в Париже республиканцы, к которым примкнул Эварист Галуа, и умеренные, среди которых был Огюст Браве, встали друг против друга как смертельные враги.

Июльская революция 1830 г. шла на убыль. На престол вступил Луи Филипп — «король-буржуа». Прикрываясь демагогической фразой о своем нежелании всякого кровопролития, Луи Филипп обратился к студентам Политехнической школы, зная, что ее воспитанники пользовались уважением и любовью парижан, чтобы они успокоили горожан. И студенты в последний раз истории Франции вышли на улицу убеждать и уговаривать людей, на этот раз с благословения наставников и короля.

Жизнь в стенах Политехнической школы продолжалась как будто без изменений. Учебный план был невероятно сложен, но благодаря великолепным педагогам, которые умели увлечь учеников своими лекциями, Огюсту удалось преодолеть все трудности. Привычка к систематическим занятиям и строгая дисциплина ума способствовали тому, что молодой Браве вышел из всех испытаний победителем.

Лекции Д. Ф. Араго пробудили интерес у Огюста к явлениям оптики и метеорологии. Результатом этих занятий была демонстрация перед слушателями своих опытов в области поляризации рассеянного света. Профессор анализа и механики Л. Пуансо, широко использовавший в этой области геометрические методы, увлек Огюста своими идеями.

В процессе учебы недостатка в учебниках не было. В то время во Франции широко пользовались учебниками О. Коши «Курс анализа» (1821 г.) и «Лекции по приложению анализа к геометрии» (1826—1828 гг.). Оба этих учебника послужили образцами при выпуске аналогичных учебников в будущем.

Нужно отметить десяти томный «Курс математики» профессора Политехнической школы С. Ф. Лакруа, издававшийся с 1797 по 1832 г. Этот многотомный труд оказал очень большое влияние на методику преподавания математики, поэтому он многократно переиздавался и переводился на многие европейские языки, в том числе и на русский, в течение почти 100 лет.

Кроме того, можно было пользоваться семитомным курсом математики, написанным Ш. Босего, который в это время был профессором и преподавателем Политехнической школы. Среди книг этого ученого особенно интересен был его двухтомник «История математики», изданный в Париже в 1810 г. В памяти питомцев Политехнической школы имя профессора Ш. Босего осталось еще и потому, что он систематизировал и издал работы таких крупных ученых, как Б. Паскаль, А. К. Клеро, Ж. Л. Д'Аламбер и других великих математиков прошлого.

Репетитор Политехнической школы Ж. Л. Бушарла написал и издал в 1828 г. «Основание интегрального и дифференциального исчисления», которые впоследствии были переведены на английский и русский языки. Известно, что этим учебником в свое время пользовался К. Маркс. Выше всяких похвал считались учебники, автором которых был Ж. Л. Лангранж: «Теория аналитических функций» (1797 г.), «Лекции по исчислению функций» (1801—1806 гг.), «Трактат о решении численных уравнений всех систем».

Помимо великолепных учебников по математике, в распоряжении учеников имелись не менее достойные учебники и по другим предметам, например «Начальный учебник химии» А. Л. Лавуазье. Для тех, кто интересовался электромагнетизмом, существовала прекрасная монография М. Ампера «Теория электромагнитных явлений, выведенная исключительно из опытов», изданная в 1826 г. В год рождения О. Браве вышел в свет «Курс механики» С. Д. Пуассона в двух томах. Этот курс был написан так увлекательно, что

легко располагал к неторопливому и вдумчивому чтению. Надо сказать, что именно С. Д. Пуассон принимал у О. Браве экзамен по данному предмету. Можно еще отметить книгу Ж. Б. Ж. Фурье «Аналитическая теория тепла». «Курс механики в приложении к машинам» вышел в 1826 г. Наконец, «Описательная геометрия» самого Монжа была основным учебником в этой области наряду с монографией «Приложение анализа к геометрии».

От воспитанников Политехнической школы требовалось умение хорошо ориентироваться в современной для того времени научной литературе. Одним из журналов, который издавался с 1810 по 1831 г., был математический журнал «Анналы Жергонна». Позже крупный французский математик Ж. Лиувиль* на базе этого журнала стал издавать «Журнал чистой и прикладной математики». Это первый в мировой истории специализированный математический журнал, издаваемый по сегодняшний день.

Долгие годы упорного труда дали свои плоды. На выпускных экзаменах Огюст Браве набрал наибольшее количество баллов и заслуженно занял первое место. Это давало ему право выбора своего дальнейшего жизненного пути. С согласия отца он выбрал службу в морском флоте. Его привлекали морские плавания, возможность увидеть дальние страны, изучать тайны природы, продолжать научные исследования, которым он предавался еще в детстве.

* Ж. Лиувиль был первоклассным математиком. Перед историей его заслуги несомненны — он «открыл» Э. Галуа (в 1848 г.) и способствовал быстрому прогрессу в развитии теории групп, которая является чисто математическим эквивалентом теории симметрии. Сегодня теория групп — важный раздел алгебры, она активно используется почти во всех областях естествознания.

Глава 3.

Путешествия

13 января 1832 г. Огюст Браве поднялся на борт брига «Финистер», который плавал в водах Средиземного моря. Вскоре он перешел на бриг «Луара» под командованием Берара, корреспондента географической секции Академии наук, которому было поручено исследование берегов Алжира.

За два лета была произведена съемка побережья французских владений в Африке. По окончании работы, 25 октября 1833 г., бриг «Луара» вернулся в Тулон. Позже Берар в своем труде «Морское описание берегов Алжира» выразил благодарность всем своим сотрудникам, а особенно Огюсту Браве, указав, насколько велика была его доля в выполнении совместной работы. В дальнейшем бриг «Луара» использовался для сообщения между Алжиром, Боном и Ораном и, учитывая враждебное отношение жителей побережья, был оснащен по-военному. Огюст Браве продолжал состоять при штабе и 1 февраля 1834 г. в возрасте 23 лет получил чин лейтенанта флота.

В своих беспрестанных рейсах от одной границы Алжира до другой «Луара» делала множество остановок в различных портах побережья. О. Браве получил тогда разрешение сходить на берег, что давало ему возможность удовлетворять свою страстную любовь к естествознанию. Флора и фауна Алжира, резко отличающиеся от флоры и фауны Севенн, давали много поводов для размышлений и сопоставлений. Браве собрал великолепные коллекции растений, насекомых, ракообразных, рыб, земноводных и морских моллюсков. Особенно интересные экземпляры он отправлял в Анноней. Иногда он и сам отвозил туда свой «улов»,

так как с момента поступления в Политехническую школу проводил свои каникулы дома.

Будучи на родине, Огюст никогда не упускал случая побывать на вершинах Пила и Скале Ветров. Иногда он возобновлял, но в более широком масштабе, прогулки и сбор гербариев, которые были радостными событиями для семьи Браве.

Очень часто во время отпуска молодой морской офицер совершал длительные путешествия с рюкзаком за спиной. Обычно его сопровождал один из братьев — аббат Камилл Браве, который был ближе всех ему по возрасту. Камилл имел ученую степень лиценциата естественных наук, а впоследствии стал преподавателем естествознания Аннонейского коллежа. Кроме того, он был хранителем городского музея, состоявшего в основном из его даров и даров семьи Браве.

Более глубокими научными исследованиями Огюст занимался с братом Луи, который в то время был уже доктором медицины и очень опытным ботаником. В начале 1835 г. оба брата отправили в Академию наук свою совместную работу под названием «Опыт о криволинейном листорасположении» (*Essai sur la disposition des feuilles curviséiées*). Эта работа по своей новизне имела мало общего с трудами ботаников того времени, которые занимались главным образом описанием видов и ботанической географией. Работа братьев Браве не относилась также к физиологии растений в обычном понимании этого слова. Это было совершенно особое оригинальное исследование.

Братья Браве не знали, что незадолго до этого К. Шимпер и А. Браун опубликовали очень интересные результаты своих наблюдений на ту же самую тему. Однако только в 1845 г. К. Шимпер предложил теорию спирального листорасположения, описанную им при исследовании морфологии окопника из семейства бурачниковых.

Успешное развитие естественной системы растений относится в основном к XIX в. Вместе с тем фрагменты ее стали формироваться уже в середине XVIII в. Первым был К. Линней, но и до него важным этапом в разработке естественной системы явились труды Б. Жюссье, продолженные его племянником А. Жюссье. С этими выдающимися ботаниками вначале доктор Браве, а потом его сыновья Огюст и Луи состояли

в постоянной переписке. В 1789 г., систематизируя и изучая собранные в ботаническом саду в Трианоне (Версаль) растения, А. Жюссье опубликовал «Роды растения». В его системе классифицируемые единицы располагались во взаимной связи, что являлось переломным моментом в развитии научной систематики. Впоследствии другие ботаники создавали несколько иные варианты естественной классификации. Прежде всего здесь нужно отметить морфологические труды О. П. Декандоля, заложившего основы сравнительной морфологии, опиравшейся на учение о симметрии и о плане строения органов. Сравнительные морфологические исследования, проведенные ботаниками в 1810—1820 гг., дали основания для выявления закономерностей листорасположения.

Впервые закон листорасположения, как вопрос для изучения, был отмечен А. Брауном в 1830 г. и К. Шимпером в 1835 г. Они открыли, что при спиральном листорасположении (наиболее частом для высших растений) точки крепления листьев образуют спираль, которую проще всего описать с помощью дроби. Числителем этой дроби является число оборотов спирали между листьями, находящимися друг над другом на стебле, т. е. расположенными на одной ортостихе, а в знаменателе — число листьев на спирали (листовой цикл), не считая последнего листа.

Аналогичные результаты, установленные для форм ветвления у растений (изучаемого преимущественно на соцветиях), были получены О. Декандолем, К. Шимпером, А. Брауном и позже немецким ботаником Репером.

Примерно с начала XIX столетия в самостоятельный раздел ботаники начали выделять исследования по морфологии растений, принявшие вид учения о метаморфозе, например сборники И. Ф. Гете (1749—1838) «Вопросы естествознания вообще и в особенности морфологии», вышедшие в период с 1817 по 1824 г. «Подход к растительному организму, как к результату закономерного развития некоторой общей структуры, давал возможность обосновать различные степени „сродства“ организмов в том плане, в каком его понимали авторы естественных систем конца XVIII—первой половины XIX в. Учение о метаморфозе внесло единообразие в описательную морфологию и сыграло в ней такую

же роль, как в естественной систематике понятие „сродства“». *

Большой вклад в развитие учения о метаморфозе внес О. П. Декандоль в работе «Элементарная теория ботаники» (1813 г.), в которой он ввел понятие о симметрии растительных форм, значительно обогатившее морфологический анализ. Руководящей идеей в морфологии растений для Декандоля было единство плана строения растительного мира, связанное им с учением о симметрии: «„Планы“, согласно которым построены различные типы растений, Декандоль уподобляет основным конфигурациям различных кристаллических систем и находит, что исследователь должен выделять их путем абстрагирующей работы мысли. В основе структуры растения, особенно в основе строения цветка, лежит, по Декандолю, определенный симметрический „план“, который может в отдельных случаях модифицироваться, причем такого рода изменения в одном органе, согласно закону корреляции, отражаются в большей или меньшей степени на других органах». **

Т. Броньяр в своем докладе, зачитанном в 1837 г. в Академии наук, заявил, что Луи и Огюст Браве собрали и изучили большое количество растений и получили огромное число данных и с большей точностью, чем это было сделано до них. Обработка полученного материала не могла быть полностью осуществлена без особого умения пользоваться непрерывными дробями, сходящимися рядами и другими сложными математическими вычислениями. О. Браве сумел их использовать с изящной простотой, показывающей талант выдающегося математика. Он блестяще сформулировал правила расположения листьев между собой и ясным и точным путем пришел к следствиям, которые без его анализа можно было бы получить только в результате длительного и медленного «нащупывания». Его выводы неожиданно для многих раскрыли строгую упорядоченность в расположении деталей растения. Такая упорядоченность, не будучи абсолютно анало-

* История биологии / Под ред. С. Р. Микулинского. М.: Наука, 1964, с. 193.

** Тахтаджян А. П. Вопросы эволюционной морфологии растений. Л., 1954, с. 23.

гичной законам кристаллографии, столь же точна и удивительна. Работа была закончена 7 февраля 1835 г., сдана в редакцию 27 апреля того же года, а увидела свет лишь в 1837 г.

Наиболее интересна первая часть работы, посвященная геометрическим законам спирального расположения. При этом авторы (а точнее Огюст Браве) пользуются следующими тремя допущениями: 1) линии прикрепления расположены на цилиндрической поверхности; 2) обороты вторичной спирали геометрически являются винтовыми линиями; 3) эти винтовые линии всегда параллельны друг другу и разделены равными расстояниями (эквидистантны).

Сам способ исследования заключается в развертке цилиндрической поверхности на плоскость. При этом у О. Браве рассмотрено два принципиально различных случая: в первом — характеристики спиралей взаимно просты; во втором — они имеют общие множители (мутовчатое расположение). Как частные случаи, при этом получается двурядное и супротивчатое листорасположение.

Во второй главе дается общая теория листорасположения, основанная на построении подходящих аддитивных рядов (главным образом простейшего ряда Фибоначчи, весь первый параграф посвящен ряду (1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, ...)).

Браве исследовал взаимосвязь между рядом Фибоначчи и отношениями $2/5$, $3/8$, $5/13$, $8/21$, $13/34$ (сами эти числа были найдены еще А. Брауном и К. Шимпером). Затем рассмотрено соотношение выделенных им рядов с цепными дробями вида:

$$\frac{1}{n + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}$$

В итоге получена общая классификация аддитивных рядов:

- 1, 2, 3, 5, 8, 13...
- 1, 3, 4, 7, 11, 19...
- 1, 4, 5, 9, 14, 23...
- 1, 5, 6, 11, 18, 28...
- 1, n , $n+1$, $2n+1$, $3n+2$, $5n+3$...

Для всех рядов Браве нашел углы, на которые совершаются повороты спирали, используя при этом технологию вычислений, характерную скорее для кристаллографа, чем для ботаника. Здесь-то и сказана основательная математическая подготовка воспитанника Политехнической школы. Дальнейшая часть работы содержит богатый фактический материал, обработанный в соответствии с методикой, изложенной в двух первых главах. В заключение авторы приходят к следующим выводам:

1. При объединении кратных спиралей с взаимно простыми характеристиками их пересечения расположены на основной генетической спирали. Их дивергенция (расхождение) постоянна от начала до конца соединения.

2. Если характеристики спирали имеют общие делители (например 2, 3, 4), то точки прикрепления имеют мутовчатый характер и в них расположены 2, 3, 4 листа соответственно. Эти мутовки скрещиваются друг с другом под углом с постоянной дивергенцией от начала и до конца.

3. Для большинства исследованных растений прикрепление чередующееся и дивергенция основной генетической спирали является иррациональным углом, равным $137^{\circ} 30' 28''$, который является не чем иным, как малым сегментом окружности, деленным в среднем и крайнем отношениях. Этот угол отвечает ряду 1, 2, 3, 5, 8, 13, ..., т. е. «золотому сечению».

4. Могут существовать намного более редкие распределения, у которых дивергенция всегда иррациональна и может быть равна $99^{\circ} 30' 66''$, (соответствует ряду 1, 3, 4, 7, 11, ...), $77^{\circ} 57' 19''$ (ряд 1, 4, 5, 9, 14, ...), $151^{\circ} 8' 8''$ (ряд 2, 5, 7, 13, 20, ...).

5. Средние значения этих углов выдерживаются постоянными по высоте растения.

6. Прочие крепления могут давать ложные мутовки, когда крепления группируются попарно, по трое на той же высоте стебля (ствола).

7. Основная генетическая спираль продолжается и на подземном стебле, сохраняя постоянную дивергенцию, и это же иногда наблюдается вплоть до органов цветка.

Большинство данных, полученных братьями Браве, до сих пор сохраняет свое значение. Продолжением

этих работ явились труды немецкого ботаника Ропера, классификация которого, основанная, в частности, на симметрии растений, принята и сегодня, правда, с некоторыми оговорками.

Огюст и Луи Браве написали вместе еще несколько статей по ботанике, и их работы получили заслуженное внимание и признание, причем не только в Париже. Они вызвали интерес у ботаников других стран Европы, и О. Декандоль и А. Р. Пьер назвали новый род семейства «Бравазия» — в честь двух братьев Браве. Высокую оценку получили также многие экспонаты по естественной истории, которые О. Браве высылал из Алжира. В 1835 г. он нашел на острове Фешгун новый для этих мест вид змеи *Amphislène cendú*. Свою находку он посвятил де Бланвиллю, выразившему свое удивление по поводу появления подобного «жителя» в этих местах. За высылку семян и растений, собранных в провинции Оран, он получил благодарность от администрации музея в Анноней. Более того, его попросили пополнить гербарий Дефонтен и выразили надежду, что в своих будущих путешествиях он продолжит свои ботанические изыскания.

Такие успехи только удваивали усердие молодого морского офицера и заставляли его подчас забывать, что он не в мирных горах департаментов Ардеш или Дофине. В связи с этим ему нередко приходилось выслушивать доброжелательные упреки своих командиров за безрассудную отвагу. Дело в том, что как раз в это время завоевание Алжира, приостановленное с 1830 по 1834 г. из дипломатических соображений, было снова возобновлено. Французы заняли несколько изолированных пунктов, например Бон, Оран, т. е. как раз те места, вдоль которых курсировал бриг «Луара». Жители внутренней части страны под предводительством Абу эль-Кадера в Маскаре, боровшиеся за полную независимость родины, оказывали французам сильное сопротивление. Используя соперничество между Францией и Англией, Абу эль-Кадер получал материальную поддержку и оружие из Марокко и Гибралтара (захваченного англичанами в 1800 г.). Можно только сказать, что, «к счастью для кристаллографии и ботаники», основные боевые действия в 1835 г. развертывались на суше. За все время военных действий французские войска была дважды разбиты патриотами, на

берегах Макты и на самом побережье. 12 августа 1837 г. в сложной боевой обстановке О. Браве возглавил группу из 37 матросов и освободил командира и хирурга «Луары», схваченных во время охоты солдатами эмира. К сожалению, ему не удалось спасти еще одного офицера, которого арабские всадники успели увести очень далеко. Но прошли годы и захваченный в плен офицер де Франсе написал интересную книгу о пленниках Абу эль-Кадера. В ней описывалось, как с высокого места, где находился автор, он видел, с какой храбростью и хладнокровием сражался лейтенант флота Браве. Он так хорошо расположил свое «войско» и с такой яростью напал на арабов, что в одно мгновение обратил их в бегство. «Если бы отвага и бесстрашие могли меня спасти, — отмечал де Франсе, — то, без сомнения, смелость г-на Браве обеспечила бы мне освобождение».*

Командир брига был ранен в руку и поэтому не мог писать, первый помощник попал в плен. В связи с этим составление рапорта о ходе сражения, в котором команда брига потеряла двух матросов, выпало на долю Браве. При составлении этого рапорта он был настолько скромнен, что по возможности избегал писать о своих заслугах в сражении. Морской министр выразил благодарность всему бригу «Луара», не выделив никого персонально. Личная скромность молодого лейтенанта принесла ему еще большее уважение его товарищей по оружию. Однако в дальнейшем наступит день, когда он будет награжден, но за заслуги совсем другого рода.

Природа щедро одарила О. Браве. Он был мужественным морским офицером, страстным натуралистом и, по мнению самого О. Коши, незаурядным геометром. По примеру прошлых лет, когда он, изучая риторiku и философию в коллеже Станислава, в течение двух лет проводил ночи за чтением книг по математике, на борту «Луары» Браве снова возобновил свои ночные занятия. С согласия командира и благодаря своим товарищам, которые часто вместо него стояли на вахтах, он уединялся в своей каюте и проводил ночи за вычислениями и решениями поставленных перед собою

* Цит.: *Beaumont Elie de.* Eloge historique d'Auguste Bravais // *Mém. Acad. sc. Ins. Imp. France.* 1866. Т. 35. Р. 30 (далее: *Beaumont*).

задач. Сначала он произвел необходимые вычисления для приведения к более простому виду результатов гидрологических съемок берегов Алжира. Попутно, как мы уже знаем, он провел математическую часть работы по ботанике, опубликованную им совместно с его старшим братом. В результате всего этого у Браве сложилась совершенно особая карьера, соответствующая его природным способностям.

К числу математических работ, выполненных Браве на борту «Луары», относятся две статьи: «О методах, используемых при съемках под парусом» (лодочная съемка) и «О равновесии плавающих тел». При написании последней статьи Огюст Браве находился под непосредственным влиянием работ Ш. Дюпена, являвшегося одновременно теоретиком, практиком и хорошим организатором морской инженерной службы. Практические интересы Дюпена были сосредоточены на судостроении, а его теоретические исследования тяготели к геометрии. В его большом труде «Геометрические рассуждения», вышедшем в 1813 г., в геометрию была введена масса новых теорем, отличающихся большим изяществом. Эту книгу О. Браве брал с собой в плавание на «Луаре». Получив отпуск в Морском министерстве, О. Браве на основе двух упомянутых выше статей написал две диссертации, которые и защитил в октябре 1837 г. в Лионском университете, получив ученую степень доктора наук. Его диссертации имели заслуженное признание. Морской министр выписал для порттовых библиотек значительное количество экземпляров второй работы для ее практического использования. К защите Браве представил одобрительный отзыв о своих работах от знаменитого Пуассона. Последний на выпускных экзаменах в Политехнической школе поинтересовался, почему Браве не посвящает себя чистой науке. Именно по его совету Браве послал в Академию наук несколько «Заметок» по анализу геометрии. В них он следовал направлению основателя Политехнической школы Г. Монжа, к тому времени уже скончавшегося. Об этих «Заметках» с большой похвалой отзывались С. Пуассон, Ж. Штурм и Ф. Савар.*

* Ж. Ш. Ф. Штурм уже в 1836 г. был академиком. С 1840 г. он являлся профессором Политехнической школы. Его консультации были весьма полезны для О. Браве. Ф. Савар — физик, был избран

Блестящие отзывы ведущих ученых Франции и ходатайства перед Морским министерством привело к тому, что морской министр включил О. Браве в Северную научную экспедицию с целью проведения чисто научной работы.

Северная научная экспедиция была организована для поисков бесследно исчезнувшего брига «Лилуаз», направленного в 1833 г. для контроля над рыболовством у берегов Исландии. Капитаном судна был лейтенант флота де Блоссвилль, известный как опытный моряк, возглавлявший до этого две большие научные экспедиции, его помощник Р. Л. д'Оней был страстным исследователем. Оба молодых офицера перед отплытием поклялись в том, что сделают все возможное для осуществления новых открытий. Подробно исследовав берега Исландии, они решили произвести разведку восточных берегов Гренландии, покрытых вековыми льдами. При первой попытке 29 июля 1833 г., маневрируя среди плавающих льдин, им удалось проникнуть на расстояние 24 миль от побережья Гренландии и произвести съемку гор. Однако «Лилуаз», корпус которого не был приспособлен к таким экспедициям, оказался серьезно поврежденным плавающими айсбергами. Мореплаватели были вынуждены уйти из этих мест для ремонта корабля. Несмотря на это, они были полны решимости попытаться еще раз приблизиться к берегам Гренландии. Существует предположение, что в августе бриг «Лилуаз» углубился в ледяные поля. Начиная с 25 августа ни одна из рыболовных шхун, плававших в этих широтах, не встречала бриг «Лилуаз».

Судьба корабля очень волновала командующего флотом и всех тех, кто знал и ценил двух молодых офицеров, которые им командовали. С наступлением зимы опасения за их жизнь возросли. Весной 1834 г. бриг «Борделез» был послан в Исландское море со специальной миссией — отыскать «Лилуаз». Однако он вернулся из плавания, не принеся никаких вестей.

В 1835 г. корвет «Ла Решерш» под командованием лейтенанта Треуара в свою очередь получил задание отыскать следы пропавшего судна «Лилуаз». И опять безрезультатно.

академиком в 1827 г. С 1820 г. он являлся профессором физики, а позднее хранителем физического кабинета в коллеже де Франс. Им был изобретен прибор для поляризации света.

Гемар, который принимал активное участие в обнаружении на рифах Ваникоро обломков погибшего при кораблекрушении «Лаперуза», предложил свою помощь при поисках пропавшей экспедиции де Блоссвилля. Возглавив Северную научную экспедицию, Гемар поставил перед всеми участниками похода серьезные задачи, не ограничиваться поисками пропавшего брига «Лилуаз». Он стремился к новым открытиям для науки. Поэтому состав экспедиции был весьма разнообразен: в него входили выдающиеся ученые, художники, литераторы. Все попытки найти следы «Лилуаз» оказались тщетными. Однако Северная экспедиция собрала много материалов для дальнейших крупных работ. В результате был составлен проект изучения Шпицбергена в Лапландии. Группа ученых, которые оставались на зимовку, была увеличена — в нее включили доктора Мартена, одного из известных в то время ботаников и выдающегося метеоролога, а также О. Браве и несколько скандинавских ученых. Инструкции для экспедиции готовились специальной комиссией Академии наук.

Корвет «Ла Решерш» был переоснащен и под командованием лейтенанта флота Фабра 13 июля 1838 г. покинул Гаврский порт, взяв курс на север. Он увозил на своем борту большую часть членов экспедиции под непосредственным руководством г-на Гемара. Ученые были снабжены необходимым научным оборудованием. Во время краткого захода в Тронхэйм, древнюю столицу Норвегии, были приняты на борт шведские, норвежские и датские ученые. В порту Гаммерфест на корвет было погружено снаряжение, необходимое для зимовки ученых. После этого «Ла Решерш» взял курс на Шпицберген. 25 июля он встал на якорь в заливе Бельсунн, на западном побережье группы островов, в 70° 30' с. ш.

Ученые и морские офицеры немедленно принялись за научные наблюдения. Астрономические, физические, метеорологические наблюдения, различные течения и температура моря, великолепные ледники, сползавшие с вершин гор до самого залива, геологическое строение крутых, лишенных растительности гор, слабые следы растительности вдоль побережья — все это стало объектом многочисленных исследований О. Браве. С детства привыкший ходить по горам, он первым

достиг крутой вершины пика, которому по единогласному решению всей экспедиции было дано его имя.

Морские офицеры, входившие в состав экспедиции, сняли подробный план залива Бельсунн, а Лоттен и Браве определили азимут залива, высоту гор и склонение магнитной стрелки.

В высоких широтах, как известно, лето не продолжительно. Уже 5 августа командир корабля дал сигнал к отплытию, а 12 августа «Ла Решерш» вновь бросил якорь в порту Гаммерфест. Во время этого перехода Браве и Мартен сделали измерения температуры воды на различных глубинах Ледовитого океана.

Браве, Лоттен, норвежский физик и астроном Лилленхек, а также художник Бевале высадились в Гаммерфесте, чтобы перезимовать в Лапландии. Корвет же возвратился в Брест.

Северная часть Атлантического океана в течение зимы бывает окутана густым, непрекращающимся туманом, который совершенно скрывает небо. В связи с этим ученые решили не оставаться в Гаммерфесте, а переехать в деревеньку Боссекоп, расположенную в 70 км в глубь страны. Климат там холоднее, но зато небо несравненно яснее, чем у берегов океана.

1 сентября ученые уже обосновались в Боссекопе и установили там свои многочисленные инструменты: телескопы, теодолиты, огромные буссоли, барометры, актинометры, термометры, пиргелиометры и др. Маленький деревянный дом, купленный ими, был превращен в астрономическую обсерваторию; пять соседних хижин стали метеорологическими, магнитными. . . обсерваториями. Боссекоп расположен на $69^{\circ} 58'$ с. ш., т. е. на $3^{\circ} 25'$ севернее Полярного круга. С середины ноября стала показываться только верхняя часть солнечного диска. С 17 ноября солнце совершенно скрылось. В течение некоторого времени южный горизонт к полудню еще прояснялся слабым сумеречным светом, но вскоре и он исчез. Наступила беспросветная темнота, воцарилась ночь. Только 31 января показался краешек солнечного диска. Народ, расположившийся на крышах домов, криками восторга приветствовал первые лучи, брошенные солнцем на землю. Началось празднование «пробуждения солнца» от сна, продолжавшегося около 2. 5 месяцев. Дождаться дня празднования «пробуждения солнца» в Боссекопе мог не каждый — для

этого нужно было иметь много мужества, терпения и горячей любви к науке.

В этот день прекращается всякая работа, люди поздравляют друг друга, танцуют, пьют за возвращение солнца и заключают пари о правильности хода часов, которые, будучи не регулируемы в течение двух с половиной месяцев, могли отставать или спешить. В последующие дни солнце появляется на несколько мгновений, а затем дни понемногу увеличиваются. Во время равноденствия день равен ночи, но постепенно ночные часы начинают уменьшаться, и в конце концов солнце почти не заходит за горизонт. Наступает полярный день, длящийся приблизительно три месяца и вознаграждающий жителей за долгую полярную ночь.

Особенности климата, животного и растительного мира Лапландии привлекали к себе внимание многих ученых. Но только пылкая любовь к науке помогла участникам Северной научной экспедиции преодолеть все трудности и выполнить все намеченные задачи. Вместе с жителями Боссекопа они радостно встречали праздник появления первых лучей солнца.

Благодаря систематическим наблюдениям, им удалось тщательно зафиксировать особенности климата. Иногда они ежечасно снимали показания барометра, термометра, измеряли направление ветра, изучали состояние неба, отмечали температуру поверхности земли, показания магнитных приборов и т. д. Несмотря на относительную легкость климата Лапландии, температура воздуха часто значительно снижалась, достигая 20—25 град. мороза. Было отмечено, что понижение температуры не наступает в последние часы ночи, так как в полярную ночь солнце не восходит и не заходит, а следовательно, своим теплом не влияет на колебания температуры. Последняя достигала своего максимума в 11 часов утра и минимума в 6 часов вечера.

Весь состав экспедиции разделил между собой работу и часы дежурства, так что два офицера и двое ученых одновременно выходили на вахту с такой же аккуратностью, как на военном корабле. В те же часы, когда северное сияние было особенно ярким, начинался всеобщий аврал: все были на своих местах. Несколько глотков крепкого кофе разгоняли сон, очень глубокий во время «ледяной ночи» в Лапландии. Одни следили

за возмущением магнитной стрелки, на которую, как известно, северное сияние оказывает большое влияние (в таких случаях отмечалось положение стрелки каждые пять минут). Другие под открытым небом с часами в руках отмечали различные фазы Северного сияния и его высоту над горизонтом. Головки винтов и ручек приборов иногда так остывали, что их приходилось покрывать шерстяными чехлами для того, чтобы кожа пальцев не примерзала к металлу.

Полученные данные ученые аккуратно заносили в журналы, и впоследствии они составили основу большого опубликованного труда. Помимо издания подробного дневника, Северной научной экспедицией был отдельно опубликован великолепно иллюстрированный физический атлас с описанием и изображением самых интересных явлений северных сияний, изученных членами экспедиции.

В этой книге О. Браве поместил свою заметку «Очерки о северном сиянии». По отзыву компетентных ученых того времени, статья явилась самой четкой и ясно сформулированной работой по данной теме. Задача определения высоты северного сияния над горизонтом в течение долгого времени занимала умы ученых. С известной долей вероятности полагали, что ее можно вычислить на основании параллакса, установленного по результатам двух измерений одной и той же дуги, проведенных одновременно двумя наблюдателями, находящимися на известном расстоянии друг от друга.

Применяя этот способ определения высоты северного сияния на практике, О. Браве 13 дней (с 9 по 22 января 1839 г.) провел в Юпвиге, городке, расположенном в 85 км от Боссекопа. Там он проводил измерения северного сияния, которое другие ученые наблюдали в те же мгновения в Боссекопе.

Формы большого числа дуг северного сияния, особенно наиболее правильных, были тщательно определены сотрудниками экспедиции. Браве, используя изящные геометрические построения и тригонометрические формулы, умело приведенные к очень простому виду, показал, что все эти дуги могут рассматриваться как части колец с центром, расположенным на земном радиусе, направленном к магнитному полюсу, и с плоскостью, перпендикулярной этому радиусу. Полученные

формулы дали ему возможность вычислить для каждого случая высоту кольца над поверхностью земли. В результате своих вычислений О. Браве пришел к заключению, что дуги северного сияния возникают на высоте от 100 до 200 км в области, в которой падающие звезды (аэролиты) и болиды становятся раскаленными и светящимися, т. е. у крайней границы земной атмосферы, которая на протяжении долгого времени считалась менее мощной.

После семимесячного пребывания в Лапландии 19 апреля 1839 г. оставшиеся на зимовку члены Северной научной экспедиции покинули Боссекоп и возвратились в Гаммерфест, где они продолжали свои научные работы в ожидании прибытия корвета «Ла Решерш». Последний должен был вторично доставить ученых на Шпицберген.

Растительность в Лапландии начинает просыпаться от зимней спячки очень рано, и рост растений происходит с удивительной быстротой в начале мая, так как этому способствует не заходящее солнце. Браве, вспомнив свои прежние увлечения ботаникой, снова начал заниматься составлением гербария. Однажды, желая сорвать растение, находившееся в расщелине скалы, он упал и сломал ногу. В течение нескольких недель ученый оказался обреченным на неподвижность.

Наконец «Ла Решерш» прибыл в порт. Все товарищи Браве поднялись на корабль для дальнейших работ, а Огюст был вынужден остаться один в Гаммерфесте до возврата в конце полярного лета остальных членов экспедиции. Однако, несмотря на свою больную ногу, он продолжал заниматься метеорологическими и магнитными наблюдениями, а когда появилась возможность передвигаться, он стал работать над завершением двух своих больших трудов, начатых еще во время его пребывания в Боссекопе.

Первый из этих трудов посвящен приливам и отливам, а другой — линиям уровня древнего моря.

Пребывание в Гаммерфесте и Боссекопе позволило ему значительно расширить и усовершенствовать наблюдения за приливами и отливами. Позднее он присоединил к своим собственным измерениям аналогичные измерения своих коллег, выполненные в Исландии и на Шпицбергене. После длительной проверки ему удалось определить время и высоту прилива для многих

портов Атлантического океана. Браве вычислил также для этих мест полусуточную и суточную величину прилива и отлива по Солнцу и Луне. Он был поражен относительно большой суточной величиной прилива и отлива. И это обстоятельство, сопоставленное с аналогичным явлением, наблюдаемым в другом море, привело его к мысли, что приливы и отливы Атлантического и Тихого океанов взаимно влияют друг на друга через пролив Беринга.

Берега Альтенфиорда в окрестностях Боссекопа и Гаммерфеста, как и многие другие в этих местах, имеют форму террас с почти горизонтальными поверхностями, правильность которых напоминает фортификационные работы, хотя они и созданы природой. Каждая из этих террас заканчивается возле подножия скал, у линии, оставленной эрозией, подобно той, которую море оставляет на современном берегу. На каждой террасе можно легко различить древний морской пляж, о который в течение долгого времени и на определенном уровне бились морские волны. В некоторых местах насчитывается несколько террас, расположенных одна над другой. Браве занялся определением уровня древнего моря, и здесь ботаника оказала ему важную услугу. Морское растение *Fucus vesiculosus*, широко распространенное на этих берегах, растет на подводных скалах только на определенном расстоянии ниже среднего уровня моря. Оно образует желтоватую зону с достаточно четкой и абсолютно горизонтальной поверхностью. Эта линия послужила Браве ориентиром. Исходя из этого, при помощи точного нивелирования он наметил следы древней морской эрозии. Таким образом, было установлено, что все эти следы образуют пять террас. Две из них были очень детально изучены. Оказалось, что они слегка наклонены в сторону моря, что одна из них делится на две части, наклон которых различен. Из всего этого Браве смог заключить, что эти террасы и толщи под ними находились над уровнем моря, так как если бы море опустилось, то каждая часть одной и той же террасы должна была бы иметь одинаковый уровень. Подвижность твердой коры земного шара оказалась, таким образом, полностью доказанной.

Браве занимался всеми этими вопросами вплоть до возвращения корвета со Шпицбергена. В Гаммерфесте

члены Северной научной экспедиции, работавшей под руководством Гемара, на этот раз расстались окончательно, и каждая группа вернулась в свою страну.

Браве, несмотря на свою еще больную ногу, присоединился к доктору Мартену. Они решили вернуться домой сухопутным путем. С барометром в руках, собирая гербарий, они пересекли Лапландское плато, на котором с большой точностью определили высоту нижних и верхних зон различной растительности. Своей исследовательской работой они дополнили не только описание атлантической флоры Дефонтена, что и намеревался сделать Браве, но и труды по ботанике Л. Буха и знаменитую «Флору» Валемберга.

В обширных лесах Швеции Мартен и Браве имели полную возможность изучать широко распространенную шотландскую сосну, на которую Браве уже обратил внимание в большом хвойном лесу около Боссекопа. После возвращения на родину путешественники опубликовали интересную работу о росте сосны. Полученные выводы они распространили на рост ясеня и дуба. Впоследствии Декандоль привел их данные к математической формуле, дающей возможность определить возраст сосны по ее диаметру.

Во время пребывания в Стокгольме Мартен и Браве тщательно сверили свои метеорологические приборы, в частности барометры, с инструментами, используемыми там для ежедневных метеорологических наблюдений. Они повторяли проверку своих измерительных инструментов во всех крупных городах по пути следования во Францию. Их инструменты были сверены перед отъездом и после их возвращения с приборами Парижской обсерватории. Таким образом, была получена возможность привести к единообразию показания метеорологических наблюдений, проводившихся в разных частях Европы.

Вернувшись в Париж в январе 1840 г., ученые направили на имя постоянного секретаря Академии наук Д. Ф. Араго обстоятельное письмо о работе Северной научной экспедиции. Их благородные усилия и труды были по справедливости высоко оценены и получили заслуженное вознаграждение. Браве был награжден орденом Почетного легиона и шведским орденом Шпаги.

Как лейтенанту флота Морское министерство поручило ему совместно с Лоттенем собрать воедино все результаты наблюдений по общей физике, полученные во время работы экспедиции, и позаботиться об их опубликовании. Выполнение этой задачи требовало длительной работы, но не было связано с обязательным присутствием Браве в Париже.

Зрелость. Интерес к кристаллографии

Город Лион, в котором обосновался Браве, расположен близ слияния рек Сены и Роны. В то время он являлся административным центром департамента Рона. С 1400 г. здесь постоянно действовала международная ярмарка. В те годы был одним из крупнейших центров Европейской торговли и кредита. Начиная с XV в. в нем процветала шелковая промышленность.

По прибытии в Лион О. Браве несколько дней осматривал достопримечательности города. Среди них его внимание привлекла ратуша города, построенная в XIII в., собор Сен-Жан и церковь Сен-Поль, возведенные в XII—XV вв. По своей обычной привычке он много времени уделял изучению окрестностей города и особенно их флоре.

В то время город еще не успел залечить свои раны от нашествия карательных войск Бурбонов в 1831—1834 гг. Повсюду, особенно в рабочих кварталах, на стенах виднелись следы от пуль и осколков снарядов. Население города еще хорошо помнило дни 3 декабря и 15 апреля, когда оно было вынуждено сидеть по домам.

Возвратившись из экспедиции, О. Браве дал согласие возглавить кафедру прикладной механики и астрономии на естественном факультете Лионского университета. С 1 февраля 1841 г. он приступил к исполнению своих обязанностей. Все, чем научные учреждения города располагали к тому времени, было предоставлено в распоряжение Браве. Он провел много интересных наблюдений в Лионской обсерватории. Особенно достойны упоминания его исследования так называемого зодиакального света в феврале 1842 г.

Параллельно с подготовкой соответствующего курса лекций начинающий профессор написал большую астрономическую работу. Исходя из механики взаимного притяжения звезд и Солнца, он стремился доказать, что собственное движение всей Солнечной системы направлено к звезде η -созвездия Геркулеса.

Избранный членом Лионской Академии наук, О. Браве вместе со своим отцом и двумя братьями принял активное участие в работе научного конгресса, на котором они сделали важное сообщение о характерных особенностях метеорологии юга Франции.

В 1842 г. О. Браве вместе с учеными Лорте и Фурне способствовал образованию Гидрометеорологического общества в Лионе, важные и полезные труды которого известны во Франции и по сей день.

В течение трех лет, проведенных О. Браве в Лионе, он усердно работал над редактированием большого обзорного труда под названием «Родина». В этом ему помогали ученые Лаланн, Лепилер, Мартен и многие другие. Этот труд, предпринятый с утилитарными целями, стал настоящей энциклопедией в миниатюре. О. Браве подготовил отделы по географии, физике Земли и многие другие, представляющие собой настоящие шедевры по краткости и ясности изложения.

Лион, как известно, расположен недалеко от Швейцарии и Савойи. Вид белоснежных вершин Альп, этих старых друзей детства Браве, напоминали ему Шпицберген и Лапландию. Все это снова пробудило в нем страсть к путешествиям.

В 1841 г., после окончания своего первого курса лекций, О. Браве совершил путешествие в Швейцарию. Вместе с ним поехал его брат Луи и друг Мартен. Основным местом пребывания они выбрали гору Фаульхорн. Выбор места был сделан с таким расчетом, чтобы помимо ботанических изысканий, можно было заниматься метеорологическими наблюдениями.

Фаульхорн — отдельная гора высотой 2680 м над уровнем моря, расположенная как бельведер, противостоящий самым высоким горам Бернского кантона, в том числе и Юнгфрау. Тысячи туристов поднимаются каждое лето на эту вершину, чтобы насладиться великолепным зрелищем снегов и ледников Оберланда.

Туристская гостиница стала для Мартена и Браве метеорологической обсерваторией. Они оборудовали

в ней станцию, как в Боссекопе, и с 17 июля по 5 августа провели ряд наблюдений, подобных тем, которые они осуществили в Лапландии.

Не была забыта и флора новых мест. Привыкшие к горным условиям и знакомые с применением законов физики к географии растений, путешественники собрали на склонах и в окрестностях Фаульхорна богатую жатву новых данных.

Браве и Мартен проделали также очень интересные физические эксперименты. Знаменитый химик Дюма изготовил в Париже несколько стеклянных баллонов, в которых, насколько это было возможно, он создал вакуум. Мартен взял их с собой на Фаульхорн. Эти баллоны были наполнены воздухом с вершины горы, затем тщательно закрыты и отправлены Дюма. Анализ показал, что воздух, заключенный в этих баллонах, содержал те же пропорции кислорода и азота, что и воздух, взятый Дюма в Париже, во дворе его лаборатории. В результате было установлено, что вопреки мнению Дальтона, уже опровергнутому Гей-Люссаком и Гумбольдтом, процентное соотношение составляющих элементов воздуха практически не меняется с высотой.

Когда небо было достаточно ясным, Браве проводил целые вечера за изучением явлений сумерек. Его собственные наблюдения, объединенные с работами других метеорологов, были подвергнуты математической обработке и дали новую величину мощности атмосферы, равную, по крайней мере, 100 км. Этот результат достаточно близок к величинам, полученным при измерении северных сияний в Боссекопе.

В 1842 г. ученые повторили свою экспедицию на Фаульхорн. Они продолжали серию метеорологических наблюдений, но на этот раз Браве и Мартен занялись физическими изысканиями другого рода. Пельтье, один из известных в то время физиков, присоединился к Браве, чтобы исследовать температуру кипения воды при различном барометрическом давлении. Целью этих экспериментов явилось усовершенствование таблиц, служащих для определения высоты над уровнем моря по градусу кипения воды — метод определения, в те времена более удобный, нежели барометрический.

Браве и Мартен с помощью Камилла Браве, заменившего старшего брата Луи, произвели также важные эксперименты в области распространения звука.

Были произведены взрывы на Фаульхорне и на берегу озера Бриенц, лежащего на 2041 м ниже. С каждой точки наблюдения видели вспышку и слышали звук взрыва. Измеряя по секундомеру опоздание звука по сравнению с восприятием световой вспышки, определяли скорость распространения звука. Таким образом, они нашли, что в сухом воздухе при температуре тающего снега скорость распространения звука как вверх, так и вниз равна 332 м 4 см в секунду. Этот результат совпадает с результатом знаменитого эксперимента, проведенного между Вильжюиrom и Монтери, при котором звук распространялся горизонтально.

В 1843 г. Браве не путешествовал, ибо этот год был для него годом траура. Его старший брат Луи, соавтор по работе о симметричном расположении листьев, после длительной и тяжелой болезни скончался в начале лета. Ни физическое страдание, ни сознание близкого конца не сломили духа Луи Браве, и он до своего последнего дня продолжал ботанические исследования. В письме, адресованном другу и однокашнику Л. Лаланну, инженеру дорог, О. Браве пишет: «Причиной моей скорби является случившаяся во время моего отъезда из Парижа смерть моего старшего брата, с которым мы вместе занимались ботаникой. . . Для меня это огромная потеря, которая, ко всему прочему, навеки отделяет меня от моей любимой ботаники, первой науки, которую я изучал, ведь систему Линнея я знал раньше теоремы Пифагора. . . Но надо смириться со своей участью. В наступающие времена мы будем обязаны специализироваться, разумеется в разумных пределах. Это требуется эпохой, в которой мы отодвигаем страх перед безграничностью погони за истиной в науке. . .».*

С 1845 по 1855 г. начинается новый, преимущественно «кристаллографический» этап в творчестве О. Браве. Однако в это же время им был написан большой труд по атмосферной оптике и ряд статей по метеорологии.

Основная подготовка Политехнической школы и ежевечерние занятия над решением сложных научных проблем широко развили дарования О. Браве. Он обладал редкой способностью одновременно заниматься гидрографией, навигацией, астрономией, атмосферной

* Из личного архива профессора А. Куриленко (Франция).

оптикой, физикой, геометрией, кристаллографией, естествознанием и чистым анализом. Все его статьи с неизменным успехом печатались в «Докладах Академии наук» или в крупных научных сборниках.

Незаменимая потеря не только брата и друга, но и единомышленника в науке только на короткое время прервала научные занятия О. Браве. Как ученый, он не мог бездействовать и уже на следующий год отправился в новое путешествие, последнее и, может быть, самое замечательное из всех, которые ему довелось совершить.

С трибуны Палаты депутатов Д. Ф. Араго упомянул имя О. Браве как одного из офицеров, который своими знаниями делает честь всему французскому флоту, и сравнил его даже с геометрами античности. Министр народного образования Вильмен, внимательно следивший за успехами ученого, пришел к заключению, что восхождение на Монблан увенчало бы все предыдущие работы О. Браве. Из фондов своего министерства он аккредитовал необходимые средства для выполнения этой трудной задачи.

Первым физиком, поднявшимся на Монблан, был Соссюр, вторым — О. Браве. Он разделил эту славу со своим другом Мартеном и прежним своим сотрудником доктором Лепилером.

3 августа 1787 г. Соссюру, уже прославившемуся своими путешествиями в Альпы, удалось установить свой барометр на вершине Монблана, на высоте 2450 туазов. Тогда он провел много физических экспериментов, занявших почетное место в истории метеорологии. Однако за 57 лет физика далеко шагнула вперед. Назрела необходимость повторить эксперименты Соссюра и прибавить к ним новые, о которых в его время не возникало и мысли.

Выехав из Парижа 16 июля 1844 г. с полным набором самых совершенных приборов, когда-либо используемых в экспедициях такого рода, Браве, Мартен и Лепилер остановились в Женеве, чтобы сравнить показания своих приборов с аппаратурой, использовавшейся на родине Соссюра. 28 июля они прибыли в Шамоникс, где Соссюр во время своей первой неудачной попытки в 1787 г. прождал 4 недели, пока не установилась погода, благоприятная для выполнения его

смелого замысла. Браве и его коллегам повезло не больше, чем их предшественнику.

Первая и вторая попытки не увенчались успехом из-за метеорологических явлений, представлявших известную опасность для путешественников. Наконец 28 августа они в третий раз поднялись на большое снежное плато, лежащее в 880 м от вершины Монблана. Их приборы находились там постоянно в небольшой палатке уже в течение трех недель. Ученые немедленно приступили к работе.

Ночь была ясная и холодная, и на следующий день, закончив наблюдения, в 10 часов утра они начали подъем на вершину, которую без особых трудностей достигли в 1 час 45 мин. Дул очень сильный северо-западный ветер, термометр показывал 7° ниже нуля. Солнце сияло, но дымка заволакивала наиболее удаленные части широкого горизонта, от Золотого берега (Средиземноморское побережье) до Лигурийских гор. Напротив, окружающие горы вырисовывались очень отчетливо. Насладившись видом этой величественной панорамы, Браве, Мартен и Лепилер поспешили установить свои приборы: барометр, гигрометр, психометр, актинометр, компас, приборы для измерения горизонтальной магнитной интенсивности, склонения магнитной стрелки, электрического напряжения, температуры кипения воды, а также приборы для наблюдений за оттенками окраски неба и прозрачностью воздуха (атмосферы) и т. д.

В течение пяти часов, которые мужественные исследователи провели на вершине Монблана, они постарались извлечь из своих приборов все, на что они были способны, и собрали целый ряд весьма точных показаний. С наступлением вечера, когда основные физические эксперименты были почти закончены, Браве установил теодолит и с помощью Лепилера, который записывал под его диктовку углы, начал съемку линии горизонта, измеряя углы понижений и повышений для каждой из входящих в нее гор, а также азимуты направлений. Эта линия горизонта, видимая с Монблана, которая никогда не определялась, так как Соссюр ограничился только общими замечаниями, в течение долгого времени являлась ценнейшим исходным материалом для геодезии и геологии. Работа была почти закончена, и Браве оставалось снять только наиболее

интересные части панорамы, когда его исследования были внезапно прерваны явлением, одинаково поразившим всех проводников и членов экспедиции (всего 8 человек), находившихся на вершине. Это явление наблюдалось впервые, потому что ни разу, ни при одном восхождении, никто не рискнул остаться на вершине до захода солнца.

«В 6 часов 30 минут, — пишет Браве в маленькой работе о своей съемке, — когда солнце клонилось к заходу, мы бросили взгляд на противоположную заката сторону и с удивлением увидели, как тень Монблана вырисовывалась на покрытых снегом горах восточной части нашей панорамы. С помощью теодолита я произвел съемку вершины этой тени и получил понижение в -1° . Минуту спустя оно было уже равно $-0^{\circ} 48'$ (оно поднималось по мере того, как солнце садилось). Мы оставались на вершине еще приблизительно 10 минут, занятые упаковкой оборудования, и немного торопились, так как сумерки в горах очень короткие. Я зарисовывал в панораме форму, которую приняла к тому моменту тень Монблана. Она поднималась постепенно в небо, вырисовываясь на нем, как на холсте. Тень отделялась от освещенного неба четким контуром; она продолжала расти и поднялась выше гор долины Аост, достигнув высоты в 1° и оставаясь все еще отчетливо видимой. Небо над конусом тени было окрашено в пурпурно-розовый цвет, который, как это можно наблюдать при красивых закатах, окрашивает высокие вершины. Край этого цветового оттенка вдоль всей границы конуса тени был окрашен более интенсивно в розовый цвет, и это сплошное окаймление еще больше увеличивало яркость и красочность явления.

Представьте себе теперь горы большой долины Аост, которые в свою очередь отбрасывают тени в атмосферу, края этих больших цилиндров, видимые невооруженным глазом, их нижнюю часть, темную, с немного зеленоватым оттенком и над каждой из этих теней пурпурно-розовый покров с пурпурно-розовой полосой по разделяющей их границе. Добавьте к этому правильные конусы теней, главным образом контур их верхнего гребня и наконец законы перспективы, заставляющие сходиться все линии в точке самой вершины тени Монблана, т. е. в точке, где должны были находиться тени нас самих.

Из приведенного описания вы получите лишь неполное представление о богатстве этого метеорологического явления, которое разворачивалось перед нашими глазами в течение нескольких мгновений.

Казалось, что какое-то невидимое существо сидело на окруженном пламенем троне и ангелы с искрящимися крыльями, стоя на коленях, низко склонились перед ним.

При виде такого великолепия у нас опустились руки и восторженные возгласы вырвались из груди каждого. Я видел великолепные северные сияния с их зенитными коронами, с подвижными многоцветными колоннами, с которыми не могли сравниться наши самые искусные фейерверки, но вид тени Монблана на фоне неба мне показался еще более грандиозным.

После 10 минут созерцания надо было подумать об обратном пути. К счастью, полная луна, которая, сияя, поднялась над восточной частью горизонта, помогла нам добраться до нашей палатки, куда мы и пришли после 50 минут очень быстрого спуска».*

Этот поэтический отрывок позволяет судить о восторге Браве, вызванном исключительным зрелищем. При этом не следует забывать, что температура на Монблане была —12 °С и работа с металлическими приборами несколько охлаждала воображение. Можно быть уверенным, что исследователи, оказавшиеся столь восприимчивыми к поразившему их явлению на исходе дня, ничем не пренебрегали и в течение всего дня, успешно выполнив основную цель своего трудного и опасного восхождения.

Наши исследователи, затратившие 15 часов упорного труда для снятия показаний на вершине Монблана с помощью лучших для того времени приборов и посвятившие 4 дня для того, чтобы проследить за их работой на большом плато вблизи от вершины, конечно, сумели собрать ценную научную информацию, рассеившую массу сомнений и неточностей.

1 сентября путешественники спустились в Шамоникс. Там они встретились с Камиллом Браве, который со своей стороны провел суточные наблюдения с того самого места, откуда Т. Соссюр, известный своими работами по физиологии растений, помогал своему знаменитому отцу, поднимавшемуся к вершине Монблана.

* *Beaumont*, p. 32.

Семья и друзья Браве с волнением следили за восхождением Огюста. В течение месяца его отец и сестра каждый день направлялись к тому месту в долине Анноней, откуда видна вершина Монблана и снежная гряда Альп и откуда сам Огюст в детстве часто наблюдал далекие горы. Они не преминули пойти туда и 29 августа, но пелена тумана, спустившаяся с Монблана, окутала всю долину. Наступили тревожные часы ожидания. Только через два дня они узнали из нежного письма Огюста об успехе экспедиции. То же постигло и ученых в Лионе. В лучшие бинокли невозможно было увидеть путешественников на вершине Монблана. Все приготовления, которые физики Табаро, Фурне, Лорте и другие делали, стремясь помочь смелым покорителям Монблана, все их попытки содействовать этой важной экспедиции, являвшейся гордостью Лиона, оказались большей частью бесполезными.

Коллеги Браве испытывали глубокую симпатию к своему профессору астрономии, поведение которого их очень привлекало. Обладая веселым характером, рассудительный, но полный доброты, деликатности и бескорыстия, Браве пользовался большой любовью окружающих. Хороший товарищ, всегда готовый оказать услугу, дать дельный совет, если к нему обращались за таковым, он выполнял свой долг профессора с самой скрупулезной ответственностью. Его лекции всегда привлекали многих слушателей. Браве умел оживлять их различными примерами, сопоставлениями, почерпнутыми из чрезвычайного разнообразия его исследований, украшая их своим ярким воображением. Несмотря на предполагаемую сухость, неотделимую от математических занятий, его речь была живой и яркой, полной остроумия. В ней наука соединялась с поэзией.

Его коллеги всегда сожалели, когда он говорил о своем отъезде из Лиона. Однако О. Браве должен был об этом подумать, так как печатание отчета о Северной научной экспедиции подходило к концу и вместе с ним должна была закончиться миссия, порученная ему Морским министерством.

В дальнейшем Браве должен был бы отказаться от карьеры морского офицера, но он лелеял надежду о новой экспедиции. Те, кто по праву видел в нем идеал ученого-путешественника, только поощряли его в этом

стремлении. Но непредвиденное обстоятельство положило конец сомнениям.

Академик Г. Ламе покинул кафедру физики Политехнической школы, чтобы занять место в выпускной экзаменационной комиссии. В качестве его преемника Ученый совет школы единогласно назвал О. Браве, который, будучи лейтенантом флота, имея ученую степень доктора наук, дополнительно получил звание горного инженера, так как высшее учебное заведение в Лионе, где он стал профессором, выпускало как морских офицеров, так и горных и строительных инженеров.

В течение некоторого времени подготовка курса лекций на высоком уровне наложила свой отпечаток на направление работ Браве. В этот период он опубликовал статьи об атмосферной оптике и молекулярном строении тел.

Через год после восхождения на Монблан Браве представил в Академию наук доклад о белой радуге, удачно дополнивший одну из интересных физических теорий.

В прошлом люди видели в радуге знак надежды, не зная причин ее появления. Теодорих де Доминис, Р. Декарт объясняли ее образование преломлением и отражением солнечных лучей в капельках дождевой воды. И. Ньютон дополнил это объяснение своим открытием преломления света. Однако ни один из этих знаменитых физиков и ни один из тех, кто после них детально изучал это явление, не мог убедительно объяснить образование радуги, которую можно увидеть в тумане на небольшой высоте и на незначительном расстоянии от зрителя, с радиусом, значительно меньшим, чем у обычной радуги. Браве показал, что если облако состоит из маленьких полных сфер, у которых толщина водной оболочки равна $0.38-0.55$ радиуса внутренней полый сферы, то должна образовываться белая радуга с радиусом от 34 до 40° и, следовательно, менее широкая, чем обычная радуга первого порядка, радиус которой равен $42^\circ 20'$. В обычных облаках оболочка пузырьков пар тоньше, чем этого требует теория образования белой радуги, поэтому она в них и не образуется. Ее можно увидеть только в густом тумане, который стелется по поверхности земли или моря.

Конечно, радуга не является одним из тех явлений, которые сильно поражают воображение. Однако нельзя не заметить, что прежние физики и сам Ньютон оставили это явление без исчерпывающего объяснения. Работа Браве восполнила пробел в этой области.

Радуга — не единственное явление, которое создает на небосводе геометрические фигуры с более или менее ярким свечением и окраской. Световые кольца являются более редким, но не менее замечательным явлением, чем радуга. В прежние времена они часто казались изумленным людям знаками небесного гнева. Э. Мариотт, один из основателей Академии наук, в 1681 г. проводил исследования цвета колец вокруг Солнца и Луны и связывал эти световые явления с действием, оказываемым на солнечные или лунные лучи частицами льда, находящимися во взвешенном состоянии в атмосфере, прежде чем выпасть в виде дождя или снега. Однако Гюйгенс опроверг это толкование, и в течение более века вопрос оставался невыясненным.

Многие знаменитые физики внесли свой вклад в изучение данного явления, но только Браве удалось исключить все сомнения, возникавшие в то время, и представить прохождение преломленных и отраженных лучей в виде простых и ясных формул с выводом из их пересечений самых причудливых на первый взгляд форм наблюдаемых явлений. По его мнению, в связи с большим или меньшим понижением температуры в верхних слоях атмосферы пары сгущаются и превращаются в воду или частицы льда, что вызывает выпадение дождя, снега, мелкого или крупного града. Он считал, что лед имеет кристаллы в форме правильных гексагональных призм, основанием которых служат две шестиугольные грани (грани пинакоида). Призмы иногда бывают очень вытянутыми, а иногда, наоборот, чрезвычайно короткими. В первом случае ледяные частицы, образовавшиеся в воздухе, представляют собой маленькие иголки с микроскопическим диаметром, во втором — это крохотные пластинки, гексагональные или звездообразные с почти неизмеримой толщиной. В обоих случаях эти кристаллы очень легкие. Они кружатся в воздухе как пылинки, мириады которых мы видим в солнечном свете. Падают они очень медленно, особенно при полном безветрии. Микроско-

пические по своим размерам, они обладают очень четкой и совершенной формой.

Когда ледяные частицы представляют собой игольчатые призмы, то световые, солнечные или лунные лучи, преломляясь через две смежные грани призмы, продолжают свой путь, образуя с их первоначальным направлением угол, равный приблизительно 22° . В этом случае, если маленькие призмы кружат в воздухе, возникает окрашенная радуга, очень похожая на радугу, но с радиусом только 22° , в которой светило образует центр, а красная полоса помещается с внутренней стороны. Самым частым является световое кольцо — галло. Если же маленькие призмы или только часть их медленно опускаются в спокойном воздухе и принимают вертикальное положение, то с каждой их стороны на одной и той же высоте образуется отражение светила, называемое «ложным солнцем», которое удалено от него, как и дуга светового кольца, на 22° .

Лучи света, преломляющиеся через двугранный угол в 90° , образованный гранью гексагональной призмы с ее основанием, отклоняются сильнее, чем в предыдущем случае, и образуют световое кольцо радиусом 46° . Если призмы вертикальны, они порождают появление горизонтальных колец очень яркой окраски, которые являются касательными к верхней или нижней частям светового кольца радиусом в 46° .

Когда ледяные частицы имеют форму маленьких, чрезвычайно тонких гексагональных пластинок, двугранные углы в 90° участвуют в образовании светового кольца радиусом в 46° . Если их падение в спокойном воздухе приводит в вертикальное положение только одну из их диагоналей, то мы видим, как появляется галло в 46° .

Лучи, отраженные без дисперсии света от вертикальных граней призм и шестиугольных плоскостей пинаконда, вызывают появление колец Бабине, светящихся, но бесцветных.

Можно представить себе и другие комбинации, почти все нашедшие свое воплощение в природе. Часто микроскопические кристаллы льда, кроме своих основных граней, имеют еще маленькие второстепенные грани, которые также отражают и преломляют световые лучи, причем в каждом случае под особым углом.

Анализ всех возможных случаев и исчерпывающее их объяснение, являющееся итогом наблюдений за самыми странными и редкими явлениями, дали Браве тему для большой и интересной работы, по словам его биографа, восхитившей всю ученую Европу. Рассматривая световые явления со всех точек зрения, О. Браве дополняет исследование Д. Араго о поляризованном состоянии света в собственно световых кольцах. Браве распространяет его выводы на все детали такого рода явлений.

Будучи прекрасным экспериментатором и исследователем, искусно владевшим техникой использования математических формул, Браве изобрел остроумный прибор, наглядно иллюстрировавший его выводы. На этом приборе путем быстрого вращения прозрачной призмы вокруг вертикальной оси достаточно точно воспроизводилось действие множества игольчатых пластинок льда, находящихся во взвешенном состоянии в атмосфере. Горизонтальная ориентация последних, распространяющихся во всех направлениях, вызывает наибольшее число атмосферных световых явлений. При помощи этого нового светового прибора и искусственного света в свое время в физических кабинетах воспроизводили большинство явлений метеорологической оптики.

В Лапландии и на Монблане Браве имел множество возможностей наблюдать кристаллические формы снега. Он часто встречал великолепные экземпляры кристаллов замерзшей воды и всегда описывал их с особой любовью. В своей работе о световых кольцах он с глубоким пониманием употребляет терминологию и формулы, характеризующие кристалломорфологию льда.

Отсюда начался триумфальный путь О. Браве в кристаллографии. Толчком к его кристаллографическим изысканиям, как видим, послужил интерес к кристаллографическим формам льда. Для их изучения ему пришлось углубиться в имевшуюся тогда литературу по кристаллографии. Ученый не слишком затруднял себя в поисках соответствующей литературы, ограничиваясь собственно французскими публикациями. Из текста самих «Мемуаров» ясно, что он знал почти все современные ему кристаллографические

источники, за исключением, быть может, труда И. Ф. Гесселя и М. Л. Франкенгейма.

В первую очередь здесь следует упомянуть о прославленном аббате Р. Ж. Гаюи, профессоре Нормальной и Горной школ Парижа. В 1784 г. вышло в свет его классическое произведение «Опыт теории структуры кристаллов», а в год его смерти — двухтомный «Курс кристаллографии» и новое переработанное издание четырехтомного «Курса минералогии». Помимо этого, существовала и была весьма почитаема за богатейший фактический материал «Кристаллография» Р. Делиля. В частности, в ней можно найти следующую фразу: «Непосредственным результатом кристаллизации... являются соединения... однородных молекул в определенные многогранные массы...»

Такие молекулы имеют замечательное свойство соединяться в симметрическом порядке и образовывать правильные тела, различные формы которых зависят от природы каждой соли...».*

Безусловно, и эти соображения, и теория Гаюи, наиболее полным образом изложенная в монографиях, изданных в 1822 г., и труды продолжателя Гаюи и прямого предшественника Браве Ж. Делафоса были детально проштудированы ученым в период его жизни в Париже, начиная с 1845 г. Отсюда и пошли его представления о том, что кристаллы слагаются из закономерно расположенных элементарных частиц. И здесь опять сказалась основательная математическая подготовка, которой не было у его предшественников.

Большой удачей для Браве явилось возвращение знаменитого О. Коши во Францию. С 1816 по 1830 г. он был профессором Политехнической школы, но после Июльской революции 1830 г. находился в изгнании вместе с Бурбонами и провел это время в Турине и Праге. В 1838 г. он вернулся во Францию, но не был допущен к государственным должностям и преподавал в Иезуитском коллеже. Только после революции 1848 г. Коши получил место в Сорбонне. Уже в 70-х годах XIX в. он пользовался громкой и заслуженной славой и почитался первым математиком Франции

* Делиль Р. Кристаллография, или описание форм, свойственных всем телам минерального царства в состоянии соединений соляных, каменных или металлических. Т. 1—4. Париж, 1783, с. 18.

и мира. Его влияния на творческую деятельность Огюста Браве можно проследить в двух направлениях: в теории рассеяния света и в учении о геометрии выпуклых тел. В работе «О рассеянии света», вышедшей в Праге в 1835 г., Коши на основе молекулярных представлений создает основы дисперсии света. Его общеизвестная работа о многогранниках послужила одной из основ так называемой внешней геометрии выпуклых тел и часто цитируется в настоящее время. Как увидим далее, О. Коши был одним из первых, высоко оценивших кристаллографические достижения О. Браве.

Глава 5.

Последние годы

Фанатическая любовь О. Браве к науке, путешествиям, загадочным атмосферным явлениям сделали незаметными для него те политические бури, которые проносились над его родиной. Любовь к отцу, братьям, младшей сестре укрепляла его дух и вносили умиротворение в его душу. В свои тридцать с лишним лет он был в расцвете интеллектуальных, духовных и творческих сил.

В конце 1847 г. Браве женился на Антуанетте Мутье и нашел в этом счастливом союзе все прелести новой жизни, разделенной между теплом семейного очага и продолжением научных исследований. Никогда еще он не отдавался работе с таким рвением, никогда не принимал такого активного участия в научном движении своего времени. Кроме публикации своих многочисленных работ, он участвовал в составлении «Метеорологического ежегодника Франции». Браве был одним из основателей Метеорологического общества и первым его председателем, избранным на 1 год в 1852 г.

Для большинства его коллег было несомненным, что Огюст Браве должен занять достойное место среди «бессмертных» членов Академии наук Франции.

Однако 1853 год, предшествовавший году его избрания в Академию, начался с тяжелых испытаний. В самом начале этого фатального года Огюст потерял горячо любимого отца, первого учителя, пристально следившего за его работой с отцовской нежностью, соединенной с благородной гордостью.

Почти в то же время от брюшного тифа погибает его единственный сын. Эпидемия этой страшной тогда болезни свирепствовала в Париже, особенно поражая детей. Горячо привязанный к семье, всемерно поддер-

живавшей его научные труды, Браве видел, как вместе с отцом ушли в небытие самые нежные воспоминания его детства, а со смертью сына исчезли и радости отцовства. В скором времени скончался еще один из его братьев.

В начале 1854 г. в связи с кончиной генерала Руссена во Французской Академии наук освободилось место в секции географии и навигации. Все справедливо считали, что именно в академическом кругу было место морскому офицеру и путешественнику, обогатившему науку множеством ценных наблюдений и открытий в области физической географии. И О. Браве был избран на это место.

Бюллетень Академии наук от 15 мая 1854 г. дает представление о процедуре избрания О. Браве в академии: «Академия приступает, по результатам баллотировки, к назначению на должность члена, который займет по секции географии и навигации место, оставшееся вакантным после смерти Руссена.

После первого тура голосования (54 человека, — И. Ш., П. Д.) г-н Браве получил 32 голоса; г-н Пти-Труайя — 19 голосов; Пейтос, Тесах и Жакино — каждый по одному голосу.

Г-н Браве, выделенный абсолютным числом голосов, объявляется избранным».*

Одобрение императора последовало 24 мая 1854 г., а официальный бюллетень Академии наук об избрании О. Браве датирован 29 мая.

За 1855—1856 гг. новоизбранный академик закончил редактирование статей, прочел серию серьезных докладов. Однако он переоценил свои силы. Скоро они стали ему изменять. Браве по ночам стал страдать бессонницей, а днем, во время работы, его одолевала усталость. Он хотел, как когда-то в каюте «Луары», посвятить свои ночи работе, он пытался, как в Лапландии, победить усталость крепким кофе, но его организм уже не обладал силой молодости.

Друзья и близкие стали свидетелями душераздирающей драмы. Его супруга, с одной стороны, была убеждена в том, что научная работа является спасительным отвлечением для ее мужа, с другой стороны, она опасалась усталости и чрезмерного напряжения. Ее неж-

* Beaumont, p. 45.

ность делала ее изобретательной, избегающей всяких подводных камней. Она, забыв про собственное горе, сидела до 4 часов ночи около его рабочего стола, пытаясь то умерить его пыл ученого, то поддержать его исчезающее мужество. Однако его состояние все ухудшалось. Научная работа не давала больше существенных результатов. Память изменяла ему. Все чаще и чаще он не мог вспомнить свои собственные интересные мысли, если не успевал их записать.

Браве пытался завершить большую работу о миражах, которая должна была пополнить его труды по метеорологической оптике. По своей обычной скромности он считал это сочинение требующим существенных поправок. Многое им зачеркивалось, сокращалось, переделывалось. В конце концов он испортил работу, и сам хорошо это сознавал. С горечью он понял, что не в состоянии ее больше исправить. Браве чувствовал, как мрак постепенно овладевает разумом, еще недавно таким живым и блестящим. Ему пришлось оставить Политехническую школу. Обнаружилось тяжелое мозговое заболевание, сопровождавшееся лихорадкой и резкими болями. Он мог им противиться только благодаря своему характеру и удивительному умению переносить страдания.

Супруги Браве поселились в Версале. Они жили у входа в парк, а затем рядом с лесом Вокрессон и Ламарш. Им приходилось менять квартиры, чтобы быть ближе к сельским уголкам, которые вначале нравились Браве. Он совершал довольно длинные прогулки с друзьями, остававшимися ему верными в его несчастьи. Особенно часто он встречался с доктором Бориньи, его сотрудником в «Метеорологическом ежегоднике», который до последнего дня выражал ему свою глубочайшую преданность.

Браве был еще крепок физически, он сохранял свою мягкость и ласковое выражение лица, но память была потеряна безвозвратно. Великий ученый не узнавал больше ни предметов, ни людей, окружавших его. Возможно, что он не узнавал больше и ту, которая стала для него заботливой матерью, посвятив свою жизнь облегчению его страданий. Антуанетта Браве не покидала его в течение всех семи мучительных лет.

Несколько слабых проблесков разума породили надежды, которые, однако, вскоре рассеялись. Однажды,

войдя в комнату, Браве увидел свой офицерский мундир, лежавший на стуле. Его лицо прояснилось и на глазах показались слезы. В другой раз он улыбнулся, взяв букет полевых цветов, который его сестра собрала для него и положила ему на колени. Это была его последняя улыбка. . .

На следующий день после кончины Огюста Браве неприменный секретарь Академии огласил письмо Камилла Браве, извещавшее Академию наук о потере, которую она понесла в лице Огюста Браве, скончавшегося в Версале 30 марта 1863 г.

Прекрасную характеристику героической жизни и вдохновенного творчества замечательного французского ученого дал В. И. Вернадский. Нельзя не привести целиком его слова, с исключительной глубиной и задушевностью рисующие творческий облик выдающегося кристаллографа.

«Огюст Браве был сперва морским офицером, потом профессором математики и астрономии. Он занимался главным образом вопросами физической географии и метеорологической оптики и случайно пришел к изучению кристаллов, при решении некоторых вопросов кристаллизации льда, необходимых ему для объяснения кругов около Солнца и Луны. Он смотрел на природу глазами геометра, и это Платоновое чувство природы проявилось как в одной из его первых работ о симметрии в растениях, так и в его трудах по метеорологической оптике и воззрениях на кристаллы. В кристаллографических работах О. Браве проявил необычайную ясность, изящество и глубину мысли, и его мемуары, несмотря на все новые работы в этой области, сохранили до сих пор свое значение.

Ему не удалось закончить блестяще начатое дело. Потеряв вскоре единственного малолетнего сына, он думал забыть в научной работе, и здесь, среди усиленных занятий, вдруг потерял память и через несколько лет умер в полном и мучительном сознании своего несчастья. Ни Делафос, ни Франкенгейм не достигли таких общих результатов, как Браве. . .».*

* Вернадский В. И. Основы кристаллографии. М., 1904, с. 29.

Глава 6.

Предшественники и современники Браве в науке о кристаллах

Многогранной и содержательной была творческая деятельность Огюста Браве. Механика, метеорология, геометрия, ботаника, физическая география, история мореплавания и многое другое живо привлекало внимание ученого, подвергалось тщательному изучению и развитию в его блестящих трудах.

Однако бессмертную славу в истории науки Браве заслужил благодаря своим замечательным открытиям в области кристаллографии. Бесспорно, он является одним из самых выдающихся основоположников современной структурной кристаллографии. Его имя навсегда связано с четырнадцатью группами чистых трансляций («решетки Браве»), лежащими в основе теории кристаллического состояния. Незабываемы его заслуги в разработке учения о симметрии вообще и симметрии кристаллов в частности. Творчество Браве оказало существенное влияние на дальнейшее развитие теоретической кристаллографии сперва во Франции (Э. Малляр, П. Кюри, Ф. Валлеран, Г. Фридель), а затем и во всем мире.

Прежде чем рассмотреть достижения выдающегося французского ученого в области науки о кристаллах и определить роль Браве в развитии науки о кристаллах, обратимся к истории этой науки, отметив вкратце заслуги его наиболее видных предшественников.

Первые догадки о строго закономерном внутреннем строении кристаллических образований и связанной с ним симметрией относятся к сравнительно недавнему прошлому.

В 1611 г. гениальный И. Кеплер в небольшом трактате «О шестиугольном снеге»^{*} задался вопросом

^{*} Кеплер И. О шестиугольных снежинках. М., 1982, с. 8.

о первопричине образования звездчатой шестиугольной формы снежных кристаллов. «Почему только что выпавшие снежинки, прежде чем сбиться в крупные хлопья, всегда являются шестиугольными, пушистыми как перышки с шестью лучами?» — вопрошает он. Далее мысль его обращается к причинам, заставляющим «первичные элементы» снега принимать шестиугольные контуры: «Так как всякий раз, когда падает снег, его первичные элементы имеют форму звездочек, то это должно иметь определенную причину. Ибо, если это случайность, то почему точно так же не выпадают пятиугольные и семиугольные звездочки?». * Нельзя не отметить глубину и дальновидность заданного вопроса. Лишь через двести с лишним лет Браве доказал невозможность существования в кристаллах пятерных и семерных осей симметрии (так же как и осей более высоких порядков), несовместимых с решетчатым строением кристаллических структур.

В связи с этим вопросом ученый переходит к обзору известных ему шестиугольных природных образований. Он вспоминает о пчелиных ячейках, имеющих форму ромбододекаэдров, вытянутых вдоль одной из тройных осей симметрии. При этом шесть граней, параллельных тройной оси, образуют как бы «гексагональную призму», грани которой соприкасаются с шестью соседними ячейками, заполняя без промежутков соответствующий слой. Сечение, перпендикулярное граням шестигранных призм, дает узор, состоящий из равных и параллельных шестиугольников, полностью покрывающих плоскость. Ромбододекаэдры при условии равенства, параллельной ориентировки и смежности по целым граням всецело заполняют пространство, т. е. принадлежат к тем геометрическим фигурам, которые в 1885 г. великий русский кристаллограф Е. С. Федоров назвал «параллелоэдрами». Вот как пишет об этом Кеплер: «Итак, мы имеем дело с известной геометрической фигурой, наиболее правильной, заполняющей твердое пространство так же, как, например, шестиугольник, четырехугольник, треугольник заполняют плоскости». Далее ученый обращает внимание на то, что форма зерен внутри плода граната также соответ-

* Шафрановский И. И. Кристаллографические представления И. Кеплера и его трактат «О шестиугольном снеге». М., 1971, с. 3.

ствует ромбододекаэдру. Естественно возникает вопрос: «Кто виновник ромбической (ромбододекаэдрической, — *И. Ш., П. Д.*) фигуры в ячейках пчел и зернышках финикийского яблока (граната)?». * И здесь Кеплер вспоминает о следующем опыте: одинаковые шарики из мягкого вещества, помещенные в круглый сосуд, сжимаемый со всех сторон медными обручами, принимают форму «ромбических тел», т. е. ромбододекаэдров. Отсюда он приходит к идее о геометрии шаровых упаковок, играющей и ныне основополагающую роль в структурной кристаллографии. И совсем недавно многие ученые использовали такой подход к моделированию упаковок — на этот раз случайных.

Обзор различных возможных шаровых упаковок привел его к выводу плотнейшей шаровой кубической упаковки (центры шаров образуют кубическую центрогранную решетку *F*) и двух менее плотных упаковок — простой гексагональной (решетка *H*) и простой кубической (решетка *P*). Плотнейшая шаровая гексагональная упаковка осталась ему неизвестной. Она была открыта В. Барлоу лишь в конце XIX столетия.

Исходя из всестороннего сжатия шаровых укладок, Кеплер выводит три идеальных параллелоэдра: ромбододекаэдр, гексагональную призму с пинакоидом и куб (кубооктаэдр был им пропущен). **

Применяя к снежинкам построения из шаровых частиц, Кеплер близко подходит к современным понятиям о строении кристаллов, однако окончательно на таком решении он не останавливается и оставляет вопрос открытым. Несмотря на это, мы видим в нем одного из самых первых предшественников не только Браве, но и позднейших ученых-теоретиков кристаллографии во главе с Е. С. Федоровым.

В 1667 г., т. е. через пятьдесят шесть лет после Кеплера, в «Микрографии» известного английского физика Р. Гука снова развивается мысль о сложении кристаллов из шарообразных частиц. *** К такому вы-

* Там же, с. 4.

** Кубооктаэдр был известен в незапамятной древности строителям. Купол Софийского собора в Константинополе имеет форму кубооктаэдра. Е. С. Федоров впервые показал, что кубооктаэдр является параллелоэдром, а центры кубооктаэдрической упаковки соответствуют кубической центрированной решетке *J*.

*** *Hooke R. Micrographia. London, 1667, p. 85, 86.*

воду этот замечательный исследователь пришел, рассматривая под микроскопом мелкие осколки алмаза с треугольными и шестиугольными очертаниями. Объектами его наблюдений являлись также кристаллики алюмокалиевых квасцов, поваренной соли, горного хрусталя и других веществ.

«Думаю, — пишет Гук, — что, обладая достаточным временем и необходимыми возможностями, я мог бы доказать положение, согласно которому все эти правильные фигуры (кристаллы, — *И. Ш., П. Д.*), поразительно разнообразные и причудливо украшающие множество тел, образуются в результате лишь трех или четырех расположений или комбинаций сферических частиц. . . Последнее я продемонстрировал *ad oculum** с помощью нескольких шаровидных ядер и других очень простых тел. Я убедился, что не было ни одной из известных мне правильных фигур, ни одного из вышеупомянутых тел, которых я не мог бы воспроизвести, сочетая круглые шарики или ядра, а иногда и просто механически соединяя их вместе». ** Прекрасные гравированные изображения спайных осколков алмаза и соответствующих построений из шаров наглядно иллюстрируют сказанное.

В 1669 г. вышли в свет два сочинения, заложивших основу будущей геометрической и физической кристаллографии. В трактате Н. Стенона «О твердом, естественно содержащемся в твердом» на примере кварца впервые отмечен закон постоянства углов для кристаллов определенного вещества. *** Второй трактат Э. Бартолина описывал опыты с двупреломляющим исландским кристаллом, которые привели к открытию чудесного и необычайного преломления, **** т. е. двупреломления. Оба датских ученых, являясь основоположниками геометрической кристаллографии и кристаллофизики, должны быть упомянуты среди ранних предшественников Браве, хотя они и не высказывали своих суждений о внутреннем строении кристаллов.

* Наглядно (лат.).

** Гаюи Р. Ж. Структура кристаллов. М.; Л., 1962, с. 153, 154.

*** *Stenonis N. De Solido Intra Solidum Naturaliter Contento.* Florentise, 1669.

**** *Bartholini E. Experimente Crystalli Islandici Distiacastici Quibus mira et insolika Refractio detegitur Anno. Hafniae, 1669.*

К этому вопросу снова вернулся итальянец Д. Гуглиельмини в небольшом сочинении «Философские размышления, выведенные из форм солей». * В отличие от Кеплера и Гука он представляет себе кристаллические структуры сложенными не из шарообразных частиц, а из мельчайших многогранников. Так, например, октаэдрическим кристаллам алюминиевых квасцов приписывается строение из крохотных октаэдров с тетраэдрическими пустотами между ними. Таким образом, внешний облик кристалла Гуглиельмини пытался связать с формой полиэдрических элементарных частиц.

Вслед за Стеном и Бартолином он обратил особое внимание на спайность кристаллов и высказал мысль об ее структурной природе. По его предположению, плоскости спайности проходят параллельно граням элементарных полиэдров. Основные формы солей сводились им к кубу, октаэдру, шестигранной призме и косугольному параллелепипеду. Силы, соединяющие элементарные частицы в кристаллические тела, по Гуглиельмини, имеют магнитный характер.

Х. Гюйгенс в «Трактате о свете» (1690 г.) развивает идеи Кеплера и Гука. Спайность по ромбоэдру и оптические свойства исландского шпата объясняются им с помощью гипотезы, согласно которой кристаллы кальцита построены из мельчайших сплюснутых эллипсоидов вращения. «Так как углы нашего кристалла и способ, которым он раскалывается, точно соответствуют тому, что получается для фигуры, составленной таким способом из сфероидов, мы имеем большое основание полагать, что частицы его образованы подобным же образом», — заключает он. ** В своих высказываниях о внутреннем строении кальцита Гюйгенс всецело основывается на форме гипотетических частиц. Однако, по справедливому замечанию Е. С. Федорова, «сущность дела не в форме мельчайших слагающих элементов кристалла, а в их расположении». *** На рисунке Гюйгенса хорошо видно, что эллипсоидальные частицы образуют в совокупности трехмерную решетку.

* *Guglielmini D.* Reflessioni Filosofiche Dedotte della Figure de Sali. Bologna, 1689.

** *Гюйгенс Х.* Трактат о свете. М.; Л., 1935, с. 120.

*** *Федоров Е. С.* Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, с. 11.

Именно такой подход к вопросу о строении исландского шпата дан в «Оптике» И. Ньютона, изданной в 1721 г. «Частицы исландского шпата, — пишет он, — действуют на лучи все в одном направлении, вызывая необыкновенное преломление, по этому нельзя ли предположить, что при образовании этого кристалла частицы не только установились в строй и ряды, застывая в правильных фигурах, но также посредством некоторой полярной способности повернули свои одинаковые стороны в одинаковом направлении?». * Как указывал академик С. И. Вавилов, здесь совершенно четко сформулирована идея кристаллической решетки. **

В середине XVIII в. замечательные мысли о кристаллах были высказаны М. В. Ломоносовым. Год написания его диссертации «О рождении и природе селитры» (1749 г.) можно считать датой зарождения русской научной кристаллографии. Строение кристаллов селитры представлялось ему в виде плотнейшей укладки из шаровых частиц. Таким образом, Ломоносов выступил сторонником гипотез Кеплера и Гука, развивая идею сложения кристаллов из шарообразных корпускул. В приведенной работе Ломоносов не только обосновывает теорию кристаллической структуры, но и вполне отчетливо формулирует закон постоянства углов исходя из гипотезы о строении кристаллов из шарообразных частиц.

В «Рассуждении о жидкости и твердости тел» (1766 г.) им описывается пространственное расположение тел (шариков), слагающих кристалл. Это описание, а также приложенная к оригинальному тексту гравюра показывают, что ученый различал два типа шаровых упаковок: плотнейшую и разреженную. Первый соответствует кубической центрогранной решетке (на плоскости шарики располагаются в виде ромбов и шестиугольников). Второй образует простую кубическую решетку (плоскостное расположение шариков отвечает квадратам).

Свои теоретические взгляды Ломоносов применял на практике. Большое значение для того времени имело

* *Ньютон И.* Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света / Перев. С. И. Вавилова. М., 1954, с. 294, 295.

** Там же, с. 361.

высказанное им положение о постоянстве (вернее, характерности) форм кристаллов рудных минералов: «Руды показываются двояким образом, из которых иные держатся свойственной себе постоянной фигуры, как кубические марказиты (пирит, — И. Ш., П. Д.), желтый сферический колчедан (халькопирит, — И. Ш., П. Д.), угловатый белый колчедан, иглам подобная сурьма (антимонит, — И. Ш., П. Д.) и многие другие», — написано в «Слове о рождении минералов» (1757 г.). *

Для понимания важности этого положения, предвосхищавшего закон Браве о важнейших гранях, достаточно противопоставить ему мнение известного французского натуралиста Ж. Бюффона, ** согласно которому кристаллическая форма не имеет постоянного характера и более разнообразна и изменчива, нежели любой признак, позволяющий различать минералы.

Ломоносову же принадлежат одни из самых ранних измерений углов на кристаллах. В этом отношении выдержка из знаменитого Ломоносовского трактата «О слоях земных» занимает почетное место в истории кристаллографии: «Наконец, отличною фигурою известные *** и больше всех дорогие камни последуют своим в рождении законам геометрическим углами и плоскостями. Многие из них родятся ромбической фигуры, имея два угла по шестьдесят и два по сто двадцать градусов, что я нарочно мерил у некоторого немалого неграненого алмаза и у других прозрачных камней». ****

Закон постоянства кристаллографических углов снова привлек внимание ученых лишь в самом конце XVIII в. Он окончательно утвердился в науке после выхода в свет «Кристаллографии» французского естествоиспытателя Ж. Б. Ромэ-Делиля. «Грани кристалла могут изменяться по своей форме и относительным размерам, но их взаимные наклоны постоянны

* Ломоносов М. В. Полн. собр. соч. Т. 5. М.; Л., 1954, с. 340.

** *L'Isle M. De Romé de. Cristallographie. . . Vol. 1. P. 18.*

*** Ломоносов М. В. Полн. собр. соч. Т. 5, с. 599.

Очевидно, Ломоносов измерял кривогранный кристалл алмаза ромбододекаэдра, плоские углы на гранях которого равны $70^{\circ}38'$ и $109^{\circ}28'$.

**** См. кн.: Стенон Н. О твердом, естественно содержащемся в твердом. Л., 1957, с. 138.

и неизменны для каждого рода кристаллов». В этой формулировке Ромэ-Делиль обобщил свои многолетние труды по измерению многочисленных углов на кристаллах разнообразных веществ. Закон постоянства углов явился надежным фундаментом для развития геометрической кристаллографии и вместе с тем дал богатейший материал для установления истинной симметрии кристаллических тел. Подобно своему прямому предшественнику Н. Стенону, Ромэ-Делиль, старательно изучая кристаллы и измеряя углы между гранями, не позволял себе углубляться в рассуждения о внутреннем кристаллическом строении. «Ограничимся же тем, что нам дает наблюдение, если мы не хотим подменить плодами нашего воображения величественного молчания природы относительно ее первичных элементов», — демонстративно провозглашал осторожный ученый.* Такого же взгляда придерживался и глава описательной немецкой минералогической школы А. Г. Вернер, обращавший все свое внимание на внешние признаки, а в том числе и внешние формы минералов.

Гораздо смелее в этом отношении был Р. Ж. Гаюи, младший современник и удачливый соперник Ромэ-Делиля. Кристалл кальцита в виде гексагональной призмы, разбившийся на множество ромбоэдрических спайных осколков, навел ученого на мысль о новой теории строения кристаллов. Являясь прямым продолжателем идейной линии Кеплера, Гюйгенса, Ломоносова, Гука, Гаюи, в отличие от них, вслед за Гуглиельмини приписал элементарным кристаллическим частицам не шаровую, а полиэдрическую форму (до него, также основываясь на спайности, аналогичную идею выдвигал Т. Бергман). По воззрениям Гаюи, кристаллы представляют как бы своеобразные укладки мельчайших «кирпичиков», соответствующих по форме предельно малым спайным осколкам. Закономерно уменьшая число «кирпичиков» в последующих наслоениях, слагающих кристалл, можно построить разнообразные формы одного и того же кристаллического вещества. Так, например, из «кубических частиц» по «законам убывания» складываются ромбододекаэдр, пентагон-дodeкаэдр, октаэдр и другие формы кубической системы. Ясно, что грани в подобных постройках будут иметь характер

* Там же, с. 143.

лестничных ступенек, а не идеальных плоскостей. Такие мельчайшие ступеньки в большинстве случаев невидимы для глаз, но иногда они появляются в виде штрихов, бороздок и проч.

Как указывалось выше, основным материалом для построения теории Гаюи служили спайные осколки, тщательно изучавшиеся и измерявшиеся с помощью прикладного гониометра. В связи с этим Ромэ-Делиль, враждебно настроенный против теории Гаюи, ядовито называл его «кристаллокластом», т. е. «разбивателем кристаллов». Чисто опытным путем Гаюи нашел пять типов примитивных спайных «кирпичиков»: параллелепипед, гексагональную призму, ромбододекаэдр, октаэдр и тетраэдр. За исключением двух последних, они соответствуют федоровским параллелоэдрам. В отличие от Федорова, Гаюи нашел их экспериментально, а не теоретически. Среди примитивных форм Гаюи, так же как и у Кеплера, отсутствует федоровский «гептапараллелоэдр» — кубookтаэдр. Дальнейшее деление простейших форм вдоль плоскости, параллельной их граням, приводит к осколкам в виде тетраэдров, трехгранных призм и параллелепипедов. Этим простейшим по числу граней замкнутым многогранникам (тетраэдр — 4 грани, тригональная призма — 5 граней, параллелепипед — 6 граней) Гаюи приписал роль интегрирующих молекул. Складываясь, они образуют примитивные «кирпичики», из которых строятся кристаллические образования. Анализ таких фигур показывает, что все они могут складываться в системы параллелепипедов. Придя к выводу о наличии в каждом кристалле совокупности мельчайших параллелепипедов, равных между собой и смежных по целым граням, Гаюи тем самым заложил основу для будущей теории параллелепипедально-решетчатого строения кристаллов, развитой Браве. Как видим, несмотря на свою наивность с современной точки зрения, концепция французского кристаллографа сыграла большую роль в истории. Мало того, отдельные ее детали дожили, хотя и в видоизмененном виде, до наших дней. Достаточно вспомнить хотя бы знаменитый закон рациональности двойных отношений параметров (закон Гаюи), на котором базируется современное учение о кристаллографических символах. Очень важно отметить также, что Гаюи одним из первых обратил внимание на симметрию

кристаллов. «Законы убывания, — писал он, — подчиняются другому закону, который мы назовем законом симметрии. . . Идентичные части ядра (кристалла) обладают между собой таким сходством, что при их взаимной замене путем перемещения ядра относительно глаза облик ядра будет казаться неизменившимся».*

Говоря о теории Гаюи, мы всегда должны помнить о том, что автор пытался ее обосновать на экспериментальном материале. Углубленное изучение законов спайности позволило ему сделать замечательные открытия. Так, например, исходя из октаэдрической спайности флюорита (фтористого кальция), он нашел взаимное расположение октаэдрических и тетраэдрических фрагментов структуры, в точности соответствующее расположению атомов кальция и фтора в современной структурной модели этого минерала.

Вскоре Э. Митчерлих окончательно установил в науке и сделал широко известными явления полиморфизма и изоморфизма. Открытие полиморфных модификаций серы, углерода, углекислого кальция, а также многочисленных изоморфных рядов, столь характерных для минералогии, казалось бы, нанесло жестокий удар основным воззрениям Гаюи.

Лишь сравнительно недавно изучение строения кристаллов с помощью рентгеноструктурного анализа позволило выяснить сущность полиморфизма и выявить физико-химическую динамику реальных кристаллических структур. Тем самым получил окончательное решение вопрос об единстве строения и химизма кристаллов. Однако в начале прошлого столетия об этом вопросе судили иначе. После краткого триумфа теория Гаюи была ниспровергнута и временно забыта.

Немецкие кристаллографы во главе с Х. С. Вейсом, категорически отказавшись от атомистической теории и отбросив вопрос о кристаллическом строении, вернулись к усиленным наблюдениям над внешней формой кристаллов. Позиции этих ученых несколько напоминают уже пройденные этапы. Прямым их предшественником был Ромэ-Делиль. По характеристике Е. С. Федорова: «. . . теория Вейса по сравнению с теорией Гаюи была явным шагом назад, так как вместо систематиче-

* Гаюи Р. Ж. Избр. тр.: Структура кристаллов. М.: Л., 1962, с. 132.

ского развития идеи, положенной Гаюи как надежное основание будущего здания, Вейс, уступая духу эмпиризма, в значительной степени стал делать шаги ощупью». * И все же, несмотря на это, Вейсу удалось открыть закон поясов, лежащий в основе зональной кристаллографии.

Выдающейся заслугой Вейса является установление кристаллографических систем (сингоний), описанных в статье «Наглядное изложение естественного деления систем кристаллизации» (1813—1815 гг.). Сингонии, как хорошо известно, являются краеугольным камнем кристаллографии. Примечательным является то обстоятельство, что при характеристике сингоний Вейс исходил из особенностей кристаллографических координатных осей. Однако четких указаний на симметрию этих осей у него еще нет.

Вскоре после выхода в свет работы Вейса начались ожесточенные споры по поводу приоритета установления сингоний. Одни приписывали честь этого открытия Вейсу, другие указывали на то, что еще до опубликования статьи Вейса профессор минералогии во Фрейбурге, а затем в Вене Ф. Мосс в своих лекциях подразделял кристаллы на те же системы. ** В «Основах минералогии», появившихся в 1822 г., Мосс описывает свою классификацию кристаллов. Так же как и Вейс, он определяет кристаллические формы с помощью кристаллографических осей, но для моноклинных и триклинных кристаллов принимает косоугольные системы. В этом отношении им сделан шаг вперед по сравнению с Вейсом.

Многочисленные последователи Вейса и Мосса (Ф. Науман, Г. Розе и др.), отказавшись от теоретических обобщений, всецело посвятили себя изучению и описанию кристаллических форм, основываясь главным образом на точных гониометрических измерениях.

Несмотря на временную победу немецкой описательной кристаллографической школы, ряд авторов все же пытался продолжить и структурное направление в кристаллографии. Отталкиваясь от теории Гаюи, они

* Федоров Е. С. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, с. 10, 11.

** Имя Ф. Мосса памятно главным образом по общеизвестной десятибалльной шкале твердости, до сих пор употребляющейся в минералогической практике.

стремились внести в нее ряд поправок и уточнений. Выдающийся английский ученый В. Г. Волластон обратил внимание на то, что полиэдрическая форма кристаллических молекул Гаюи может быть выведена из элементарных шариков Гука и эллипсоидов вращения Гюйгенса.*

При выводе строения гексагональных призматических кристаллов берилла и других минералов Волластон заменял шаровую форму элементарных частиц вытянутыми эллипсоидами вращения. Предвосхищая позднейшие достижения структурной кристаллографии, он предлагал для кристаллов с кубической спайностью использовать укладки шаров двух сортов (черных и белых), расположенных точно так же, как расположены ионы натрия и хлора в современных моделях строения поваренной соли. Волластон отмечал также, что шарообразные частицы можно заменять математическими точками, вокруг которых действуют взаимно уравновешенные силы притяжения и отталкивания, так что шаровая форма частиц является по сути дела мнимой. Это его высказывание напоминает нынешние представления о сферах действия атомов и ионов внутри кристаллических структур. Вместе с тем замена шариков центральными точками подводила вплотную и к идее о пространственных решетках.

Еще ближе к выводам Браве подошел в 1824 г. профессор физики во Фрейбурге А. Зеебер.** Ученик великого Гаусса, он выступил со статьей «Опыт объяснения внутреннего строения твердых тел». Вместо соприкасающихся друг с другом полиэдрических «молекул» Зеебер предложил в центрах таких полиэдров помещать маленькие шарообразные «атомы». Расстояние между ними и маленькая их величина должны были, по мнению автора, объяснять явления расширения и сжатия кристаллов, обусловленные температурой и давлением, и тем самым устранить неувязки между опытными данными и учением Гаюи. По теории последнего, вплотную прилегающие друг к другу «кирпичики-молекулы», образующие сплошную кладку без свободных промежут-

* *Wollaston W. H. On the elementary particles of certain crystals. London, 1813, p. 51—63.*

** *Seeber L. A. Versuch einer Erklärung des inneren Baues der festen Körper // Gilberts Ann. Phys. 1824. Bd 76. S: 229—248.*

ков, явно не позволяли бы кристаллу расширяться или сжиматься. Маленькие частицы («атомы»), по мысли Зеебера, должны были притягиваться друг к другу силами, аналогичными силам притяжения, но не допускающими соприкосновения частиц и порождающими равновесное расположение «атомов» внутри кристаллического тела.

Возвращаясь к Гаюи, Зеебер предложил, несколько упрощая эту теорию, помещать свои маленькие «шарики-атомы» не в центрах «интегрирующих молекул», а в центральных точках параллелепипедальных «молекул убывания». Сам ученый усиленно подчеркивал такой подход в следующем отрывке: «Объясняя природные плоскости разъединения некоторых веществ, Гаюи приписывал им интегрирующие молекулы призматической и тетраэдрической формы. Заменим в этих веществах новыми маленькими атомами не эти молекулы, а параллелепипедальные молекулы убывания. Тогда по всем направлениям останутся природные плоскости граней разъединения, которые не рассекут ни одну из молекул в образованных ими системах. Вместе с тем эти плоскости разъединения объясняются с помощью новых атомов так же хорошо, как они объяснялись посредством замененных ими интегрирующих молекул. При этом новым, не соприкасающимся друг с другом атомам не следует придавать различные, часто сложные местоположения, которые они могут получить в результате замены интегрирующих молекул. Они получают единственное простое расположение вследствие замены во всех случаях молекул убывания. Этот род расположения мы назовем параллелепипедальным».*

Здесь ясно обрисован путь перехода от молекулярных построек Гаюи к пространственным решеткам. Зеебер не называет еще предложенную им совокупность разъединенных мельчайших шариков решеткой, однако отмечает ее параллелепипедальный характер и даже называет само расположение частиц параллелепипедальным.

Статья Зеебера в свое время осталась незамеченной. Лишь полвека спустя, в 1879 г., ее заново открыл Л. Зонке, отметивший идеи забытого автора в истори-

* In: *Sohncke L. Entwicklung einer Theorie der Kristallstruktur.* Leipzig, 1879, S. 12, 13.

ческом введении к своей знаменитой книге «Развитие одной теории кристаллической структуры».

В истории кристаллографии Л. А. Зеебер занимает теперь место одного из наиболее значительных ранних предшественников М. Л. Франкенгейма и О. Браве. Ему же принадлежат лавры первооткрывателя геометрического истолкования положительных тройных квадратных форм. Будучи преподавателем кристаллографии, а также других главным образом физических дисциплин, он уже в указанной выше работе отметил, что теория положительных тройных квадратных форм — полезный инструмент в кристаллографии. В работе «Исследования о свойствах положительных териарных квадратичных форм» (1831 г.) он рассмотрел теорию их приведения.

В 1835 г. вышла в свет большая монография М. Л. Франкенгейма «Учение о сцеплении (связи), охватывающее упругость газов, упругость и связь жидких и твердых тел и учение о кристаллах». Эта книга знаменует собой новый решительный шаг в развитии теории решетчатого строения кристаллов.

М. Л. Франкенгейм родился в 1801 г. в Брауншвейге. В 1826—1827 гг. он был доцентом Берлинского университета, а затем профессором физики в университете в Бреславле. Он принадлежит к числу крупнейших кристаллографов прошлого века. К сожалению, труды ученого оказались заслоненными работами последующих авторов и не получили заслуженного внимания ни при его жизни, ни впоследствии.

Он является непосредственным предшественником и конкурентом Огюста Браве.

Помимо упомянутой монографии, М. Л. Франкенгейму принадлежат многочисленные исследования в области кристаллохимии и кристаллофизики. В частности, в 1836 г. он впервые обнаружил ныне широко известный факт эпитаксии кубических кристаллов иодистого калия на пинакоидальных плоскостях 001 моноклинной слюды. Это открытие породило впоследствии обильную литературу. Особое место учеными уделялось явлениям изоморфизма и полиморфизма. Роль М. Л. Франкенгейма в понимании полиморфизма предельно точно обрисована В. И. Вернадским: «Уже к 1830-м годам, — пишет он, — относятся замечательные работы бреславльского профессора М. Франкенгейма, талантливо-

го и самостоятельного ученого, стоявшего в стороне от общего течения в науке и породившего в своих работах мысли, которых мы придерживаемся в настоящее время, но которые не оказали влияния на воззрения его времени. В этих работах Франкенгейм впервые свел явления полиморфизма на различные состояния твердого тела, указал на их зависимость от температуры, на полную (не только формальную) аналогию точек перехода с точками плавления, кипения и т. д. Уже Франкенгейм заметил, что полиморфизм есть чрезвычайно распространенное свойство тел. Он вновь придал силу идеям Гаюи, утверждавшего, что для каждого химического соединения возможно только одно определенное кристаллическое строение, вводя в это воззрение поправку: при данных температуре и давлении. В развитии этих идей Франкенгейма заключается будущее нашей науки».*

Будучи убежденным сторонником атомизма, Франкенгейм, естественно, не нашел поддержки своим взглядам среди представителей формальной немецкой школы «динамистов».

Приведенное выше развернутое название главного труда Франкенгейма «Учение о сцеплении» дает представление о весьма широком охвате материала, рассмотренного в книге. Помимо газов и жидкостей, особое внимание здесь уделено твердому телу вообще и кристаллам в частности.

Раздел «Учение о кристаллах» подразделяется на следующие главы: 1) Кристаллография; 2) Характер кристаллографических рядов; 3) Кристаллофизика; 4) Кристаллогения.

Наибольший интерес представляют те страницы этого раздела, в которых Франкенгейм развивает свои взгляды на строение кристаллов и впервые, к сожалению, лишь в самом кратком виде сообщает о результатах вывода пятнадцати (вместо четырнадцати) пространственных решеток.

Франкенгейм совершенно четко излагает понятия о пространственной решетке исходя из одинаковости свойств по параллельным направлениям в кристаллическом теле, т. е. из анизотропности (векториальности)

* Вернадский В. И. Очерк развития кристаллографии. Ч. 1, вып. 1. М., 1904, с. 26.

кристаллов. К сожалению, он не приводит здесь, хотя бы в конспективном виде, те положения, которые позволили ему вывести 15 «семейств» — пятнадцать аналогов четырнадцати трехмерных решеток Браве.

Сам Франкенгейм, объясняя фрагментарность приведенных сведений, пишет об этом так: «Мне кажется неуместным развивать здесь полностью эту гипотезу. Я неохотно вступаю в скользкую область таких гипотез и твердо убежден в истине приведенного первого положения предлагаемой гипотезы».*

В 1842 г. в большой статье «Система кристаллов»** им подробно излагается сущность вывода решетчатых семейств. Наконец, в 1856 г., уже после выхода в свет знаменитого мемуара О. Браве в статье «Расположение молекул в кристалле» Франкенгейм заново пересматривает результаты своего вывода и приходит к заключению, что одна и та же моноклинная решетка была ошибочно принята им дважды и отнесена к двум разным решеткам.

Пользуясь современной терминологией, напомним, что так называемая центробазисная моноклинная решетка может быть представлена как центробазисная с прямоугольным центрированным основанием и как примитивная с ромбическим основанием. Это обстоятельство и ввело в заблуждение Франкенгейма. Как бы то ни было, но приоритет установления четырнадцати решеток пришлось уступить Браве, имя которого они носят поныне. Упоминая об этом инциденте, Зонке признает правильность такого решения. Он пишет: «Вывод Франкенгейма вообще не является достаточно строгим и уступает по ясности и наглядности выводу Браве»***.

Творческая судьба М. Л. Франкенгейма дает много поводов для размышления. Ведь совсем недавно известный швейцарский математик И. Буркхардт открыл, что за четыре года до Гесселя, т. е. в 1826 г., Франкенгейм вывел аналитически 32 класса конечной кристал-

* *Frankenheim M. L. Die lehre von der Cohäsion. Breslau, 1835, S. 312.*

** *Frankenheim M. L. System der Crystalle // Nova Acta Acad. Caesareae Leopoldina — Carolinae Naturae Curiosorum. 1842. T. 19, Abth. 2. S. 471—660.*

*** *Sohncke L. Entwicklung einer Theorie der Kristallstructur. Leipzig, 1879, S. 18.*

логографической симметрии. * Этот фундаментальный результат был полностью игнорирован современниками ученого.

Среди предшественников О. Браве видное место занимает французский минералог и кристаллограф Ж. Делафос. Верный ученик и последователь Р. Ж. Гаюи, Делафос помогал своему великому учителю в подготовке к изданию знаменитого «Курса минералогии».

С 1841 г. он занимал кафедру минералогии в Парижской Нормальной школе, освободившуюся после смерти Бедана. В 1857 г., т. е. через 35 лет после смерти Гаюи, его пригласили на кафедру минералогии в Национальном музее Натуральной истории, возглавлявшуюся до 1822 г. его учителем. Возвращаясь к идеям Гаюи, Ж. Делафос в своих работах указывал на необходимость отличать интегрирующие молекулы от химических молекул. Разрабатывая вопрос о взаимосвязи между формой и структурой, он пришел к понятию кристаллической решетки. Развивая рассуждения Гаюи о спайности, Делафос установил, что «внутри кристалла молекулы систематически отделены друг от друга таким образом, что можно представить их совокупности в виде некоторой конфигурации, более или менее точно соответствующей образу решетки, составленной из параллелепипедальных ячеек». Далее ученый приходит к выводу, что «интегрирующая молекула Гаюи является не чем иным, как наименьшим параллелепипедом, образованным соседними молекулами, совпадающими с его вершинами. Иначе говоря, она представляет мельчайшие межмолекулярные расстояния, или ячейку (клетку) кристаллической решетки. Тем самым она существенно отличается от физической молекулы, которая может иметь и в действительности часто имеет совсем другую форму. Эта последняя является истинным атомистическим элементом тела, независимо от кристаллического расстояния. Интегрирующая частица представляет элемент геометрической структуры, когда подразумевается это частное образование. . .» **.

* *Burckhardt J.* Die Entdeckung der 32 Kristallklassen durch M. L. Frankenheim in Jahre 1826 // *Ib. Miner. Mh.* Jg. 1984. H. 11. S: 481, 482.

** *Delafosse G.* Recherches sur la cristallisation considérée sous les

Тем самым Делафос, так же как Зеебер и Франкенгейм, отошел от концепции Гаюи о непрерывности кристаллического строения, всецело заполненного материей, и стремился рассматривать отдельно физические молекулы и их геометрическое расположение в кристаллах.

Затруднения, которых не смог преодолеть Гаюи, исчезают, если учитывать, что геометрически идентичные части кристалла не являются обязательно такими в физическом отношении вследствие разницы в структурных деталях или в молекулярном составе этих структур. Убеденный в плодотворности атомистических теорий, Делафос резко критиковал формально-геометрический характер немецкой школы Вейса и Наумана. Он осуждал метафизическую школу динамистов, философские взгляды которых стояли в полном противоречии с атомизмом. Основываясь на атомистической теории, Делафос считал, что частицы находятся в положении равновесия в кристаллической решетке.

Профессор Ж. Орсель — современный апологет выдающегося французского кристаллографа прошлого века, заканчивая свой очерк о нем, пишет: «Творчество Ж. Делафоса является существенным этапом в развитии кристаллографии XIX века. Между тем в истории науки ему не отводится то место, которое он заслуживает».

Многотрудные и глубокие изыскания Делафоса были заслонены блестящим творчеством О. Браве, которому принадлежит честь развития теории решетчатых систем и разработки математического аппарата, позволяющего точно их характеризовать».*

Среди перечисленных выше предшественников Браве наиболее приблизился к нему и по сути дела даже предвосхитил самый его вывод М. Л. Франкенгейм. Ведь лишь досадная ошибка в подсчете моноклинных решеток не позволила ему стать первым автором правильного вывода 14 трансляционных групп.

Ж. Делафосу принадлежит честь введения в науку термина «решетки», или «сетки» (*reseau*). Его рассу-
ж-

rapports physiques et mathématiques // *Mém. pres. divers Savants. Acad. Sci. Inst. France.* 1843. T. 8. P. 13.

* *Orcel J.* Les sciences minéralogiques au XIX siècle. Paris, 1962, p. 40.

дения о форме молекул могут с первого взгляда показаться шагом назад по сравнению с положениями Зеебера и Франкенгейма, заменившими полиэдрические молекулы Гаюи крохотными шариками или точками. В самом деле, Делафос в этом вопросе усложнил понятие решетки, поместив в ее узлах полиэдрические фигурки. Однако, как мы увидим далее, дело здесь гораздо сложнее. Рассматривая конфигурации молекул как результат сочетания атомов, ученый тем самым заменял систему узлов простой решетки совокупностями нескольких решеток, вставленных друг в друга. Таким образом, в какой-то мере он приближался к современной трактовке реальных структур. К сожалению, в его время, когда еще не вошли в сознание 32 закона конечной кристаллографической симметрии, такая попытка была явно беспомощной и преждевременной.

Такие ученые, как А. Д. Купфер, Ф. Э. Нейман, И. Г. Грассман, В. Х. Миллер и др., дали в своих трудах начало математической кристаллографии и подвели строго научный фундамент под практику кристаллоизмерения. Они ввели гномонические и стереографические проекции, создали точные методы характеристики кристаллографических форм с помощью символов, наконец, подготовили почву для вывода законов кристаллографической симметрии.

Как увидим далее, Браве принадлежат большие заслуги в развитии учения о симметрии полиэдров (и вообще конечных тел), играющем первостепенную роль в науке о кристаллах.

Его прямыми предшественниками в этом направлении являются М. Л. Франкенгейм, который, как уже отмечалось, в 1826 г. вывел 32 класса конечной кристаллографической симметрии, и И. Ф. Гессель, который независимо от первого в 1830 г. вывел все законы конечной симметрии, как кристаллографической, так и некристаллографической. К сожалению, результаты, полученные Э. Галуа по теории групп, были совершенно никому не известны, и соединение «симметрии» и теории групп впервые было реализовано К. Жорданом в 1865 г. Что касается группового вывода точечной кристаллографической симметрии, то он был сделан Б. Миннигероде в 1879 г. И. Ф. Гессель вывел и соответствующие многогранники (простые формы) и указал на возможность существования их разновид-

ностей, отличающихся по симметрии. К сожалению, этот вывод в свое время прошел совершенно незамеченным.

Вслед за Гесселем, не зная о его выводе, представили оригинальное, но лишь частное решение той же задачи О. Браве (1848 г.) и А. В. Гадолин (1867 г.). Впоследствии к той же проблеме во всем ее объеме вернулись П. Кюри (1884 г.) и Е. С. Федоров (1885 г.).

И. Ф. Х. Гессель родился в Нюрнберге в семье купца и владельца сургучной фабрики. С 1813 г. он изучал медицину в Эрлангене и Вюрцбурге и в 1817 г. получил ученую степень доктора. Став ассистентом профессора-минералога Е. Леонардо в Гейдельберге, Гессель увлеченно штудировал ориктогнозию и кристаллографию параллельно с математикой, физикой и химией, а в 1821 г. удостоивается степени доктора философии. В этом же году он становится профессором минералогии, технологии и пробирного искусства в Марбурге и не оставляет эту должность до своей кончины в 1872 г.

До конца жизни Гессель оставался творчески деятельным и неутомимым в научных изысканиях. В повседневной жизни это был простой, тихий и скромный человек. Занятия со студентами он проводил в собственном домике с темными и неудобными комнатами, загроможденными минералогическими и палеонтологическими коллекциями, моделями пространственных фигур собственного изготовления и деталями машин. Сидя за столом среди своих учеников, профессор знакомил их со своими замечательными открытиями и выводами.

Его педагогическая деятельность поражает своей многогранностью. Он читал курсы ориктогнозии, стехиометрии, технологии материалов, механики, высшей математики. С особенной любовью преподавал он геометрию, главным образом стереометрию и учение о полиэдрах. Не менее разносторонней была и его литературная работа. Ему принадлежат исследования по математике, кристаллографии, астрономии, химии, зоологии, ботанике.

Помимо первостепенного по значению трактата Гесселя о кристаллографии и позднейшего сочинения о пространственных фигурах (1862 г.), колоссальный интерес представляет сообщение 1826 г., в котором единственный тогда известный кальциево-натровый по-

левой шпат (лабрадор) рассматривается как изоморфная смесь альбита и анортита, причем приводится обобщающая химическая формула для переходных членов этого изоморфного ряда. В упомянутом сообщении Гессель предвосхищает известную теорию полевых шпатов Г. Чермака (1871 г.), опередив ее чуть ли не на полстолетия. Это замечательное открытие Гесселя постигла такая же фатальная неудача, как и его вывод конечной симметрии. Оно прошло совершенно незамеченным, и лишь в 1891 г. И. И. Лемберг напомнил о нем в журнале немецкого Географического общества.

Основным трудом, обессмертившим имя Гесселя и поставившим его среди наиболее выдающихся классиков кристаллографии, является обширный трактат, опубликованный в 1830 г. в виде специального раздела «Физического словаря» Гелера. Полное название этого мемуара в переиздании следующее: «Кристаллометрия, или кристаллономия и кристаллография, разработанная оригинальным образом на основе нового общего учения собственно о фигурах, с полным обозрением важнейших работ и методов других кристаллографов».* Стремление Гесселя называть все предложенные им понятия сложными чисто немецкими терминами, в большинстве случаев придуманными им же самим, привело к тому, что на протяжении всей его работы вовсе не встречается слово «симметрия», хотя весь его труд всецело основан именно на симметрии. Учитывая это, мы видим, что Гессель поставил перед собой задачу найти все возможные случаи конечной симметрии и для каждого такого случая вывести соответствующие формы. Не ограничиваясь видами кристаллографической симметрии, он принимает во внимание «все мыслимые системы фигур».

Помимо полного вывода законов конечной симметрии, Гесселю принадлежит также первый исчерпывающий вывод всех простых форм, причем им принимались во внимание не только кристаллографические, но и геометрические многогранники с гранями, связанными элементами симметрии.

* *Hessel J. F. C. Kristallometrie oder Kristallonomie und Kristallographie // Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften. 1897. Bd 2, N 89. P. 3, 4.*

Своеобразная немецкая номенклатура И. Гесселя, тяжеловесность изложения, громоздкость избранного им метода, многочисленные опечатки в тексте первого издания — все это сделало его замечательное сочинение чрезвычайно труднодоступным для понимания. В результате этот труд долгое время оставался совершенно неизвестным. Этому способствовала, по словам Е. С. Федорова, также «поразительная неподготовленность большинства минералогов к восприятию идей, имеющих математическую подкладку».*

Тихий, скромный, несколько старомодный в жизни, но далеко опередивший свое время в научном творчестве, Гессель пережил и триумф О. Браве и успехи А. В. Гадолина.

В 1862 г. Гессель опубликовал монографию «О некоторых удивительных статических и механических свойствах пространственных тел, обладающих центром тяжести, и особенно гомогенных тел. Также о значении этих свойств для учений физики, относящихся к различным кристаллам». В этом сочинении ученый снова возвращается к выведенным им видам симметрии, причем вместо 27 (из 32) точечных групп он указывает 31, тем самым выводя группы симметрии таблеток (по современной терминологии).

Эта монография И. Ф. Х. Гесселя также не нашла признания. А. В. Шубников объясняет это «крайне неудачным заглавием статьи», а также тем, что она была издана «в честь юбилея никому не известного Герлинга по случаю присуждения ему звания доктора философии». Отмечает он и характерную для Гесселя тяжеловесность изложения. «Гениальный по результатам, но несовершенный по форме, написанный тяжелым и непонятным языком. . . труд Гесселя разделил судьбу многих других подобных сочинений, написанных „для себя“, т. е. не привлек к себе внимания современников и был надолго забыт. . .».** Лишь в 1891 г. Л. Зонке заново открывает забытые работы И. Гесселя и воздает должное его достижениям.

Таким образом, из всех выдающихся предшественников Браве лишь Франкенгейм и Гессель не только предвосхитили его достижения в области симметрии

* Федоров Е. С. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, с. 15.

** Шубников А. В. У истоков кристаллографии. М., 1972, с. 26, 27.

конечных тел, но и превзошли их в связи с существенным пробелом, допущенным в работе французским ученым. Браве в своем перечне элементов симметрии не учел инверсионных, или зеркально-поворотных осей.

В 1867 г. петербургский академик А. В. Гадолин опубликовал «Вывод всех кристаллографических тел, систем и их подразделений из одного общего начала». В этом сочинении автор ограничился, как и Франкенгейм, выводом лишь 32 кристаллографических видов симметрии. Не зная о выводах Франкенгейма, Гесселя, Браве, он, однако, принял во внимание наличие инверсионных осей.

В 1883 г. Е. С. Федоров представил в Минералогическое общество свой первый капитальный труд «Начала учения о фигурах», опубликованный лишь через два года. В нем независимо от И. Гесселя, забытые сочинения которого в то время еще не были заново открыты, дается полный вывод видов симметрии для всех без исключения конечных фигур. При этом учитываются зеркально-поворотные оси, пропущенные О. Браве. В 1884 г. П. Кюри, обратив внимание на отсутствие у О. Браве сложной симметрии, дал понятие зеркально-поворотной оси под названием «плоскости переменной симметрии» и предложил новый вывод совокупностей элементов симметрии для конечных фигур.

Итак, несмотря на существенный недостаток сочинения Браве о симметрии многогранников, оно отнюдь не прошло бесследно. Как будет показано далее, классически ясные и простые определения основных понятий, данных Браве, до сих пор фигурируют в большинстве учебников и сводок по кристаллографии.

О. Браве — кристаллограф

Свое выдающееся место в истории кристаллографии О. Браве занял прежде всего благодаря «Мемуару о системах точек, правильно распределенных на плоскости или в пространстве», содержащему классический вывод четырнадцати пространственных решеток. Вместе с тем незабываемые заслуги принадлежат ему и в истории развития учения о симметрии. В отличие от своего предшественника в этой области И. Р. Х. Гесселя, сочинения которого были ему известны, Браве изложил свои выводы в исключительно ясной и изящной форме.

В 1849 г. он дал свой вывод законов симметрии для конечных фигур в мемуаре «Исследование о многогранниках симметричной формы». Стройность и вместе с тем простота изложения привлекли внимание кристаллографов и минералогов к этому труду. Достаточно сказать, что основные определения, сформулированные Браве, с небольшими изменениями до сих пор приводятся в учебниках кристаллографии. Об этом свидетельствуют, например, следующие определения: «Центром симметрии многогранника называется такая точка S , соединив которую с некоторой вершиной многогранника S и продолжив CS на равное расстояние, получим точку S' , также являющуюся вершиной многогранника. Точка S' является гомологичной к S по отношению к центру C ».

Столь же привычно для нас звучат определения оси и плоскости симметрии: «Осью симметрии многогранника будет называться прямая AB , удовлетворяющая следующему условию: при повороте многогранника на угол O вокруг AB новые места вершин совпадают со

старыми», или «Прямая будет называться осью симметрии, если при повороте многогранника вокруг нее на делитель $360/q$ положение вершин многогранника не изменится. Знаменатель q будет называться порядковым номером симметрии оси». Аналогично: «Плоскостью симметрии многогранника будет называться плоскость PQ , удовлетворяющая следующим условиям: если из некоторой вершины S опустить перпендикуляр Sp на эту плоскость и затем продлить его на величину, равную ему, то получится, что полученный таким образом конец Σ тоже будет вершиной многогранника». *

Коренным недостатком работы О. Браве является неполное определение симметричной фигуры: «Симметричным многогранником называется такой многогранник, который обладает либо центром симметрии, либо одной или несколькими плоскостями симметрии, либо одной или несколькими осями симметрии. Многогранник без центра, осей и плоскостей симметрии является асимметричным».** Как видим, в перечне элементов симметрии отсутствуют сложные инверсионные и зеркально-поворотные оси.

Теоремы сложения элементов симметрии, выведенные Браве, безупречны. Для иллюстрации мы процитируем несколько из них: «Во всяком конечном многограннике может существовать только один центр симметрии»; «В многограннике с центром и плоскостью симметрии нормаль к этой плоскости, проведенная через центр, является осью симметрии четного порядка»; «При наличии двух плоскостей симметрии в многограннике линия их пересечения является осью симметрии» и т. д.

На основании этих теорем выясняется, что симметричные многогранники без осей могут иметь лишь центр или одну плоскость симметрии, т. е.:

№ п/п	Обозначения	
	по Браве	современные
1	0, С, ОР	С или $\bar{1}$, $\bar{2}$
2	0, ОС, Р	Р или \bar{m} , $\bar{1}$

* Браве О. Кристаллографические этюды. Л., 1974, с. 12.

** Там же.

Попутно отметим, что и обозначения О. Браве, принятые им для элементов симметрии (L — ось, C — центр симметрии, P — плоскость симметрии), прочно вошли в литературу и до последнего времени являются наиболее употребительными.

Хорошо знакомые нам теоремы даются и при выводе симметричных многогранников с главной осью (например, число двойных осей, перпендикулярных главной оси L^q , равно 0 или q ; число плоскостей симметрии, проходящих вдоль главной оси L^q , равно 0 или q).

Учитывая следствия теорем, легко вывести различные законы симметрии для многогранников. С этой целью О. Браве к исходной главной оси по отдельности добавляет центр симметрии, перпендикулярные к главной оси двойные оси, плоскости симметрии, идущие вдоль этой же оси. Одновременно добавляются и плоскости, идущие вдоль главной оси и перпендикулярные ей, и перпендикулярные к главной оси двойные оси. В последнем случае возможны два варианта: либо двойные оси совпадают с вертикальными плоскостями симметрии, либо они проходят вдоль диагоналей между этими плоскостями.

Таким образом, для многогранников с главной осью четного наименования (L^{2q}) Браве получены следующие совокупности элементов симметрии (Π — плоскость симметрии, перпендикулярная главной оси L^q):

№ п/п	Обозначения	
	по Браве	современные
3	$\Lambda^{2q}, 0L^2, 0C, 0P$	$2n$
4	$\Lambda^{2q}, 0L^2, C, P$	$2n/m$
5	$\Lambda^{2q}, qL^2, 0C, 0P$	$2n \cdot 22$
6	$\Lambda^{2q}, 0L^2, 0C, qP, qP'$	$2n \cdot mm$
7	$\Lambda^{2q}, qL^2, qL^{2'}, C, \Pi, q^p, qP'$	$2n/mmm$
8	$\Lambda^{2q}, 2qL^2, 0C, 2qP$	$\overline{4}n2m$

Составленные законы симметрии для многогранников с главной осью нечетного наименования (Λ^{2q+1}) отвечают следующим совокупностям:

№ п/п	Обозначения	
	по Браве	современные
9	$\Lambda^{2q+1}, 0L^2, 0C, 0P$	$(2n+1)$
10	$\Lambda^{2q+1}, 0L^2, C, 0P$	$(\overline{2n+1})$
11	$\Lambda^{2q+1}, 0L^2, 0C, П$	$(\overline{4n+2})$
12	$\Lambda^{2q+1}, (2q+1) L^2, 0C, 0P$	$(2n+1) 2$
13	$\Lambda^{2q+1}, 0L^2, 0C, (2q+1) P$	$(2n+1) m$
14	$\Lambda^{2q+1}, (2q+1) L^2, C, (2q+1) P$	$(\overline{2n+1}) m$
15	$\Lambda^{2q+1}, (2q+1) L^2, 0C, П, (2q+1) P$	$(\overline{4n+2}) 2m$

Ряд теорем, относящихся к сфероздрическим многогранникам, который мы здесь опускаем, позволяет вывести следующие пять классов для четырежды тройных многогранников:

№ п/п	Обозначения	
	по Браве	современные
16	$4L^3, 3L^2, 0C, 0P$	23
17	$4L^3, 3L^2, C, 3P$	$m3$
18	$4L^3, 3L^2, 0C, 6P$	$\bar{4}3m$
19	$3L^4, 4L^3, 6L^2, 0C, 0P$	432
20	$3L^4, 4L^3, 6L^2, C, 3P, 6P'$	$m\bar{3}m$

Десятью-тройные сфероздрические многогранники (невозможные для кристаллов) соответствуют следующим классам:

№ п/п	Обозначения	
	по Браве	современные
21	$6L_6, 10L_3, 15L^2, 0C, 0P$	532
22	$6L_6, 10L_3, 15L^2, C, 15P$	$\bar{5}3m$

Итак, полное число всех выведенных классов симметрии равно 22. Сюда следует добавить 23-й класс многогранника, лишенного каких-либо элементов симметрии ($0L, 0C, 0P$). Всего, согласно О. Браве, получается 23 класса симметрии. Необходимо иметь в виду, что в один такой класс может входить множество видов симметрии с различными значениями $q(n)$.

Вследствие отсутствия среди принятых во внимание элементов симметрии инверсионных или зеркально-поворотных осей в перечне классов нет видов симметрии с одной четной инверсионной осью типа $L_i^{4q} (4\bar{n})$ ($L_i^{2(2q+1)}$ присутствует в виде простых осей вдвое меньшего наименования и перпендикулярной им плоскости $\Lambda^{2q+1} P$). Нечетные инверсионные оси также присутствуют в качестве простых осей того же наименования с присоединением центра симметрии: $\Lambda^{2q+1} C$.

Еще раз напомним, что рассмотренный мемуар О. Браве касается лишь геометрических многогранников. О симметрии кристаллов в нем не сказано ни слова.

Е. С. Федоров, характеризуя мемуар Браве «Исследование о многогранниках симметричной формы», отмечал, что его сочинение «положило основание учению о симметрии, дотоле не существовавшему. Слабую сторону является отсутствие общего определения симметрии и замена его произвольно выбранными элементами: центром, осью, плоскостью симметрии».*

Содержание следующих двух трактатов оказало решительное влияние на дальнейший ход развития математической и структурно-теоретической кристаллографии.

Как уже отмечалось, «Мемуар о системе точек, правильно распределенных на плоскости и в пространстве» (1850 г.), представляет собой строго математический трактат, значение которого заключается прежде всего в том, что в нем содержится вывод четырнадцати решеток Браве. Чтобы получить представление о строго геометрическом характере его изложения, приведем самое начало мемуара, содержащее понятия о рядах, сетках, пространственных решетках, которые сам автор называл «совокупностями». «Чтобы получить систему точек, правильно расположенных в пространстве, — пишет Браве, — возьмем две произвольные точки и соединим их неограниченно продолженной в обе стороны прямой линией. Нанесем на эту прямую бесконечное количество точек, разделенных постоянными интервалами, равными расстоянию между двумя начальными точками. Прямолинейная система равностоящих точек в этой работе будет называться рядом. Основной интер-

* Федоров Е. С. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, с. 10.

вал, разделяющий две соседние точки, будет называться параметром ряда. Возьмем второй ряд с тем же параметром и расположим его параллельно предыдущему в некотором произвольно выбранном положении. Проведем через них геометрическую плоскость, которая, естественно, будет неограничена. Нанесем на эту плоскость последовательные одинаковые, равноотстоящие параллельные ряды. Чтобы однозначно установить положение этих рядов, каждый из них как единое целое будем передвигать в направлении их длины до тех пор, пока точки, служащие начальными для каждого ряда, не окажутся на одной прямой, более или менее наклонной к общему направлению рядов. Основополагающим названием сетка обозначим совокупность точек, распределенных таким образом в плоскости.

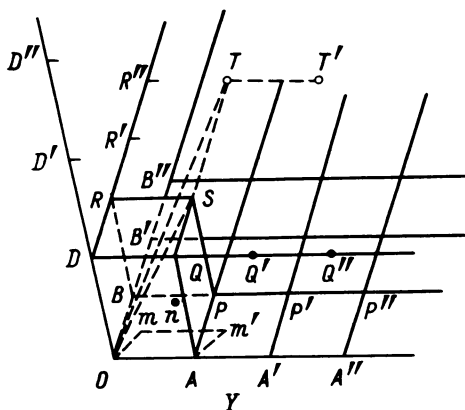
Возьмем вторую сетку такой же формы и величины, как предыдущая, и разместим ее на плоскости, параллельной плоскости первой сетки и отделенной от нее произвольным интервалом.

Позаботимся, чтобы все гомологические линии были одинаково направлены в обеих сетках, что можно сделать общим перемещением всех частей начальной сетки параллельно ей самой.

Расположим бесконечное количество одинаково повернутых тождественных сеток на бесконечном количестве равноудаленных плоскостей, параллельных двум первым. Каждую сетку в ее плоскости будем сдвигать до тех пор, пока все начальные точки каждой сетки не окажутся на одной прямой, не лежащей в плоскости начальной сетки. Таким образом, полученная система точек в нашей работе будет называться совокупностью (трехмерной решеткой, — *И. Ш., П. Д.*). Она не ограничена по всем трем измерениям.*

Браве лишь изредка несколько отвлекается от принятой им манеры изложения и приписывает точкам «совокупности» (решетки) физическую и материальную природу. Об этом свидетельствует следующая оговорка: «Прежде, чем идти дальше, остановимся на особом обозначении точек, образующих сетку или совокупность. Их следует отличать от чисто математических точек, которые существуют в любом месте пространства. Соответственно будем называть их узлами.

* Браве О. Кристаллографические этюды. Л., 1974, с. 41, 42.



Решетчатая система по Браве.

Можно приписывать этим узлам очень маленькие размеры, соизмеримые с молекулами, многогранная форма которых будет, впрочем, оставаться неопределенной».*

Далее следует ряд определений и понятий, сохранившихся в современной науке. Плоскость, содержащую в себе всю сетку с ее узлами, Браве называет «ретикулярной плоскостью». Пространство между двумя наиболее близкими параллельными ретикулярными плоскостями именуется «слоем».

«Если в пространстве параметры трех рядов OA , OB , OD могут служить ребрами параллелепипеда, не содержащего узлов, ни на боковых сторонах, ни внутри, то эти три ряда будут называться „сопряженными“... Три системы ретикулярных плоскостей, параллельные трем сопряженным плоскостям AOB , AOD , BOB , делят пространство на равные и совместимые параллельные ячейки. Таким образом, построенный на трех параметрах параллелепипед будем называть порождающим параллелепипедом, или ядром совокупности. Укладка таких параллелепипедов по целым граням воспроизведет все узлы совокупности».**

Вслед за предварительными определениями Браве переходит к геометрии плоских сеток. Тщательный их

* Там же, с. 42.

** Там же, с. 45.

анализ приводит его к «Классификации симметричных сеток». Браве различает четыре класса таких сеток, кладя в основу своей классификации оси пространственной симметрии, лежащие в плоскости сетки. В результате он получает всего пять хорошо известных видов плоских сеток, известных ныне под названиями: гексагональной (первый класс), квадратной (второй класс), ромбической (третий класс, первый класс), прямоугольной (третий класс, второй вид) и косоугольной (четвертый класс).

Далее Браве подходит к «совокупности», т. е. пространственным решеткам, трактуя в ряде теорем и поясняющих задач характерные особенности их геометрии. В параграфе о симметричных совокупностях (симметричных решетках) особое значение имеет теорема о возможных осях симметрии в решетчатых системах, которая с несколько упрощенным доказательством приводится во всех учебниках элементарной кристаллографии.

Напомним, что уже Гаюи показал невозможность появления правильного додекаэдра на кристаллах, т. е. отсутствие пятерной симметрии в кристаллографии. Гессель, опираясь на «Закон параллелограмма лучей», среди множества видов конечной симметрии выделял виды, относящиеся собственно к кристаллам.

Однако Браве первым в наиболее четком виде сформулировал кристаллографический закон симметрии и дал чисто математическое его доказательство всецело исходя из геометрии пространственных решеток.

На основании ряда основополагающих теорем ученый приходит к классификации симметричных совокупностей, характеризуя их с помощью элементов конечной симметрии. Последняя определяется следующим образом: «Если через один узел совокупности провести все оси и плоскости симметрии, которые ей свойственны, то можно рассматривать совокупность как многогранник с центром в выбранной точке».*

Соответственным совокупностям Браве придает названия, основанные на присутствующих в них осях симметрии. Понятие о них дает левый столбец таблицы, где в скобках приведены современные термины. В левом столбце содержатся символы симметрии,

* Там же, с. 106.

Совокупности	Символы их симметрии	Современные обозначения групп
Тричетверные (кубические)	$3L^4, 6L^2, 4L^3, C, 3P^4, 6P^2$	$m\bar{3}m$
Шестерные (гексагональные)	$\Lambda^6, 3L^2, 3L^2', C, \Pi, 3P^2, 3P^2$	$6/mmm$
Четверные (тетрагональные)	$\Lambda^4, 3L^2, 3L^2', C, \Pi, 2P^2, 2P^2$	$4/mmm$
Тройные (тригональные)	$\Lambda^3, 3L^2, 3P^2$	$\bar{3}m$
Тривойные (ромбические)	$\Lambda^2, L^2, L^2', C, \Pi, P^2, P^2$	mmm
Двойные (моноклинные)	Λ^2, C, Π	$2/m$
Асимметричные (триклинные)	OL, C, OP	i

т. е. совокупности элементов симметрии в том виде, как их дал сам ученый (обозначения осей и плоскостей симметрии соответствуют ныне принятым).

Как видим, все совокупности распределились по семи классам, соответствующим кристаллографическим системам (сингониям). Вместе с тем найденная для них симметрия охватывает лишь семь видов наивысшей симметрии, отвечающих голоэдри, или, по современной терминологии, планаксимальным видам симметрии.

Верный принятому им строго математическому характеру изложения, Браве не отмечает совпадения выведенных им классов симметрии решеток с кристаллографическими системами, найденными экспериментально Вейсом, Моосом и др. Этот вопрос он затронет лишь в самом конце «Мемуара» с тем, чтобы вернуться к нему позднее в своих «Кристаллографических этюдах». Не довольствуясь найденными обобщающими результатами, относящимися к симметрии совокупностей, Браве перечисляет далее виды размещения узлов, т. е. типы решеток для каждого из семи классов совокупностей (сингоний). Понятие о полученных результатах дает следующая сводка (в скобках — современные термины).

1. Первый класс — тричетверные совокупности (кубическая сингония). Три вида размещения узлов: 1) куб (примитивная кубическая решетка); 2) центрированный куб (объемно центрированная кубическая ре-

шетка); 3) куб с центрированными гранями (центрогранная кубическая решетка).

II. Второй класс — шестерные совокупности (гексагональная сингония). Единственный вид размещения узлов соответствует шести вершинам тригональной призмы. (Гексагональная решетка. Шесть упомянутых тригональных призм складываются в гексагональную призму).

III. Третий класс — четверные совокупности (тетрагональная сингония). Два вида размещения узлов: 1) прямая призма с квадратным основанием, т. е. тетрагональная призма (примитивная тетрагональная решетка); 2) прямая центрированная призма с квадратным основанием (объемно центрированная тетрагональная решетка).

IV. Четвертый класс — тройные совокупности (тригональная сингония). Единственный вид размещения узлов соответствует восьми вершинам ромбоэдра (ромбоэдрическая решетка).

V. Пятый класс — тридвойные совокупности (ромбическая сингония). Четыре вида размещения узлов: 1) прямая призма с прямоугольным основанием, т. е. комбинация трех пинакоидов в виде «кирпичика» (примитивная ромбическая решетка); 2) прямая центрированная призма с прямоугольным основанием (объемно центрированная ромбическая решетка); 3) прямая призма с ромбическим основанием (ромбическая призма), которую можно заменить прямой призмой, т. е. комбинацией из трех пинакоидов с центрированным прямоугольным основанием (центробазисная ромбическая решетка); 4) прямая центрированная призма с ромбическим основанием, которую можно заменить прямым восьмигранником с ромбическим основанием, т. е. ромбической дипирамидой (центрогранная ромбическая решетка).

VI. Шестой класс — двойные совокупности (моноклинная сингония). Два вида размещения узлов: 1) прямая нецентрированная призма с основанием в виде параллелограмма, т. е. моноклинная комбинация из трех пинакоидов (примитивная моноклинная решетка); 2) прямая центрированная призма с основанием в виде параллелограмма (центробазисная моноклинная решетка). В современной установке «основание в виде параллелограмма» совпадает с гранями 101 (двойная

ось симметрии стоит вертикально). В примечании Браве отмечает ошибку Франкенгейма, дважды подсчитавшего одну и ту же (центробазисную) моноклинную решетку.*

VII. Седьмой класс — асимметричные совокупности (триклинная сингония).

Подсчитав число видов размещения узлов, выведенных Браве, мы и придем к общеизвестным четырнадцатью решеткам, носящим ныне его имя.

Последний параграф «Мемуара» посвящен полярным совокупностям. О. Браве дает определение первичной полярной совокупности и вычисляет все их параметры (параметры решеток, объем параллелепипеда, площади основных параллелограммов сеток), доказывает теорему о сохранении симметрии (решетки) при переходе от одной совокупности к другой, ей полярной. Им построены все полярные совокупности к заданным 14 совокупностям, в частности отмечена взаимосвязь между решетками I и F в кубической сингонии (тричетверная совокупность по Браве).

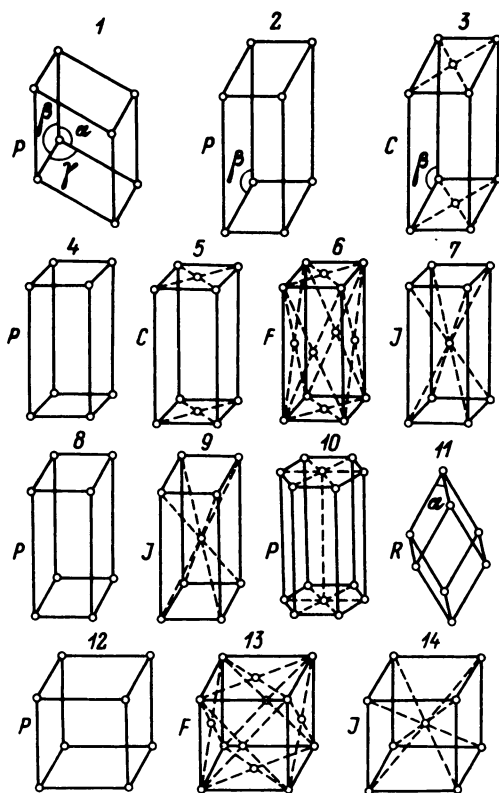
Иными словами, с целью, обусловленной главным образом требованием геометрической строгости и связью между квадратичными и тройничными формами (отмеченной автором особо, со ссылкой на Гаусса и Зеебера), Огюст Браве ввел в кристаллографию понятие прямой и обратной решеток, которые ныне доминируют в структурном анализе кристаллов.

«Казалось бы, этот мемуар, — пишет Браве, — можно рассматривать как работу, имеющую чисто умозрительный геометрический характер, так как утверждения, которые в нем доказываются, не зависят от физических свойств тел. Несмотря на это, работа была завершена автором с мыслью, что она будет служить, сверх того, для объяснения фундаментальных фактов кристаллографии. Это и явилось целью, которой руководствовался автор».**

В трактате О. Браве «Кристаллографические этюды» (1866 г.), к несчастью, прерванном смертью автора геометрические закономерности, выведенные в предыдущих трактатах, используются в целях решения основных кристаллографических задач.

* Там же, с. 110.

** Там же, с. 133.



14 решеток Браве.

Остановимся лишь на наиболее важных его деталях. В первой части «Этюд» кристалл рассматривается как простая совокупность точек. В последующем развитии теоретической кристаллографии большую роль сыграло понятие ретикулярной плотности, впервые введенное в науку Браве. «Ретикулярной плотностью грани (ghk), — определяет автор, — назовем среднее число узлов, содержащихся в единице поверхности. Этот физический феномен имеет большое влияние как на внешнюю форму кристалла, так и на его спайность».*

* Там же, с. 179.

В дальнейшем Браве, трактующий о взаимосвязи внешней формы и внутреннего строения кристалла, выдвигает ставший знаменитым закон, носящий ныне имя своего первооткрывателя. Браве сформулировал его с большой осторожностью, даже не выделив его в качестве основополагающего правила. «Можно доказать, — пишет он, — что грани, наиболее часто образующиеся на кристалле в процессе кристаллизации, или, другими словами, плоские сетки, наиболее пригодные для ограничения кристалла, являются в общем теми, ретикулярная плотность которых наиболее значительна. В самом деле, внутреннее движение, действующее непрерывно на поверхности кристаллической массы в процессе образования этой массы до некоторого момента, играет роль внешних сил, которые стремятся расщепить кристалл. Они должны, следовательно, предпочтительно избирать молекулярные цепочки в ретикулярных плоскостях с наиболее плотными сетками. В этом отношении вероятность естественного ограничения, которой обладает каждая возможная грань кристалла, должна быть хотя бы отчасти пропорциональна плотности ее сетки. Однако этот критерий кажется менее достоверным, чем тот, который выводится из рассмотрения спайности. Образование естественных граней в процессе кристаллизации подчиняется множеству посторонних сил, которые трудно проанализировать».*

Несмотря на, как теперь известно, вполне оправданную осторожность приведенной формулировки, именно это положение впоследствии было подхвачено крупнейшими кристаллографами и с некоторыми уточнениями продолжает оставаться жизненным и сейчас. Сам Браве, пользуясь своим правилом, вычислил для выведенных им решеток соответствующие важнейшие гранные формы.

Напомним, что 14 решеток Браве характеризуются лишь наивысшей симметрией семи сингоний, т. е. голоэдрией, или планаксиальными видами. Тем самым кристаллы с более низкой симметрией (примитивные, центральные, планальные, аксиальные виды) не подошли под рамки выведенных решетчатых систем. Вместе с тем на практике уже были известны многочисленные

* Там же, с. 189.

случаи мероздрических кристаллов, да и сам Браве, выводя законы симметрии конечных фигур, хорошо знал о совпадении найденных им сочетаний элементов симметрии с симметрией кристаллов, не подчиняющихся голоэдри.

Желая согласовать свою теорию с реальным материалом, Браве заменяет точечные узлы решеток фигурами «многоатомных молекул». Последним он приписывает конфигурации простых кристаллографических форм. Эта идея представляет собой развитие в широко развернутом виде упомянутой выше попытки Делафоса.

Так же как и Делафос, Браве не добился здесь окончательного успеха. Выдвинутая им задача в существенно видоизмененном виде нашла свое дальнейшее развитие в частичном выводе правильных систем точек Л. Зонке, а затем в полном выводе 230 пространственных групп Е. С. Федорова и А. Шенфлиса.

Третья часть «Кристаллографических этюдов» посвящена двойникам и гемиедриам.

Цикл кристаллографических работ Браве содержит, в сущности, самое полное сводное изложение геометрической кристаллографии того времени. Лишь намного позднее, уже в XX в., появились руководства на геометрической кристаллографии, способные соперничать с «Мемуаром о системах точек» и «Кристаллографическими этюдами».

В этих мемуарах, помимо уже отмеченных выше результатов, содержатся практически все основные формулы структурной кристаллографии, в частности формулы межплоскостных расстояний, периодов идентичности, объема ячеек и клеток, углов между сетками, углов между сеткой и вектором с кристаллографическим направлением.

В «Кристаллографических этюдах» даны формулы для вычисления углов между направлениями в решетке и углов между гранями по всем 7 сингониям. Решены задачи нахождения сеток, нормальных заданному направлению, угла между направлением и сеткой, а также ряда, нормального сетке. Формулы приведены в общем виде, и при переходе к средним и высшим сингониям они упрощаются, приобретая привычный вид, известный из руководств по геометрической кристаллографии.

В те времена, как и теперь, было принято посылать на рецензии работы, которые поступали для печати в те или иные периодические издания, особенно в труды Академии наук. Рецензентом работ Браве был прославленный О. Коши. Вот что он писал в своей развернутой рецензии о работе Браве: «Одним из наиболее значительных применений геометрии является новая наука, созданная в конце прошлого века автором „Опыта теории структуры“ (Р. Ж. Гаюи).

После того, как было замечено, что кристаллы представляют собой совокупность однородных молекул, наш знаменитый Гаюи нашел законы объединения и взаимного расположения в кристалле различных молекул. К наблюдениям, которые им были проведены, присоединены новые факты. Обогащенная плодотворными размышлениями минералогов, эта наука совершенствовалась, смогла участвовать в развитии молекулярной физики. Тем не менее О. Браве считает, что кристаллография должна быть улучшена. Он исследовал весьма интересные свойства произвольных систем материальных точек, которые могут быть использованы для классификации кристаллов. Изучение этих свойств и их характера является предметом рецензируемого мемуара. . . С помощью геометрии и анализа О. Браве установил общие свойства решеток. Он доказал, в частности, что узлы в то же время задают узлы бесконечного числа других сеток, цепочки которых пересекаются под различными углами, но площади клеток которых одинаковы. Он доказал, что среди возможных элементарных треугольников существует один и только один треугольник, все три угла которого острые. Ему было дано название основного треугольника. Он имеет в качестве сторон три наименьших параметра, которые можно получить при соединении узлов заданной сетки.

Установив свойства сеток, Браве нашел свойства совокупностей (ретикулярных систем). Он распознал, что узлы, объединяющиеся в ретикулярную систему, могут быть представлены бесконечным количеством различных способов как пересечение трех последовательностей параллельных плоскостей, которые соответствуют разным по объему порождающим параллелепипедам различной формы. Он доказал, что среди элементарных тетраэдров, соответствующих ретикулярной системе, т. е. заданной системе узлов, существует основной тет-

раздр, в котором каждый двугранный угол либо острый, либо прямой.

Наконец, О. Браве назвал осью симметрии ретикулярной системы прямую, выбранную так, что достаточно повернуть систему вокруг этой оси на некоторый угол, чтобы привести узлы к самосовпадению. Он доказал, что угол, который служит мерой вращения, должен быть равен 60, 90, 120, 180°. Так как отношение длины окружности к длине дуги поворота может быть равно 2, 3, 4, 6, то симметрия, следуя терминологии О. Браве, может быть двойной, тройной, четверной и шестерной.

Автор выделил семь классов совокупностей, или систем узлов, различных между собой по выделенным только что признакам».*

В состав комиссии, выслушавшей О. Коши, входили такие первоклассные ученые, как физик, геодезист и астроном член Академии наук Ж. Б. Био, выпускник и профессор Политехнической школы коллега О. Браве Г. Ламэ, известный физик и химик профессор Политехнической школы и в прошлом ее воспитанник, учившийся вместе с О. Браве, А. В. Реньо, известные минералоги и кристаллографы Бедан и Дюфренуа. Последний, кстаи сказать, в некоторых вопросах кристаллографии является конкурентом Браве. Заключение комиссии выглядит следующим образом: «Члены комиссии считают, что в этой новой работе О. Браве дал новые доказательства своего таланта, которые он нам продемонстрировал в других изысканиях. Следовательно, мы придерживаемся мнения, что представленный на рассмотрение мемуар вполне достоин одобрения Академии и опубликования в *Le Recueil des Savants étrangers*. Заключение доклада принято».**

Итак, в мировой кристаллографической литературе открылась еще одна страница, еще один шаг к современности — 14 решеток, согласно которым только и могут располагаться структурообразующие единицы в кристаллически упорядоченных телах. Этим 14 решеткам было присвоено имя О. Браве (решетки О. Браве). Причем этим термином одинаково охотно пользуются и кристаллографы, и математики, и физики.

* Там же, с. 281—283.

** Там же.

Как мы уже знаем, после целого года напряженной работы О. Браве представил на суд комиссии свою следующую работу «Кристаллографические этюды». Приведем отрывок из отзыва Коши на последний мемуар ученого: «В новом мемуаре, который мы рассматриваем, О. Браве не ограничился исследованием свойств ретикулярной системы, образованной центрами тяжести молекул кристалла. Проникая в глубины науки, он изучил различные формы, которые могут образовывать кристаллические молекулы, и влияние, которое эти формы могут оказать на кристаллизацию. . .

Браве приходит, кроме того, к замечательному выводу, что для объяснения всех явлений гемиздри достаточно принять во внимание это явление и эффекты, которые оно может порождать. Для доказательства этого предположения О. Браве начал исследовать различные виды симметрии, которыми могут обладать кристаллические молекулы, рассматриваемые как системы атомов, занимающие вершины многогранников. Затем он исследовал законы, по которым симметрия молекулы частично передается ретикулярной системе, образованной центрами тяжести различных молекул, из которых складывается кристалл. . .

Использование двух общих правил, которые мы только что рассмотрели, позволило О. Браве не только объяснить различные явления гемиздри, наблюдаемой при кристаллизации, но и установить законы, управляющие этими явлениями и условиями, при которых они должны проявляться. Наблюдения показывают, что эти законы и условия справедливы. Столь же удачно то, что после упомянутых исследований ретикулярных систем понятие кристаллической формы (системы соседних граней, представляющих кристалл) О. Браве применил к анализу сокращенного числа граней при гемиздри. Он показал, что с помощью его теории можно объяснить большое число случаев диморфизма, не исключая внутренней структуры молекулы.

Члены комиссии придерживаются мнения, что работа, представленная на рецензию, дала новые доказательства проницательности, которую О. Браве уже проявил в своих предыдущих изысканиях, и что эта работа несомненно будет способствовать развитию кристаллографии. Они считают, следовательно, что новый ме-

муар О. Браве достоин одобрения Академии и опубликования в *Le Recueil des Savants étrangers*.

Заключения этого доклада приняты».*

Таков вклад Огюста Браве в развитие современной геометрической кристаллографии дисконтинуума. Данные им точные и емкие определения и формулы живут и в сегодняшней кристаллографической литературе.

* Там же, с. 285—288.

Глава 8.

Развитие идей Браве

Блестящие достижения О. Браве в области теоретической кристаллографии получили всеобщее признание далеко не сразу. Первыми оценили его выводы математики (см. приведенные выше отзывы знаменитого О. Л. Коши). Значительно позднее к ним обратились минералоги и кристаллографы. Одним из первых, положивших теорию решетчатого строения в основу систематического изложения математической кристаллографии, был Э. Малляр. В предисловии к своему «Курсу геометрической и физической кристаллографии» (1879 г.) он выражает удивление по поводу малой известности замечательных работ Браве. После его выступления эти работы обратили на себя внимание других ученых, и прежде всего представителей французской кристаллографо-минералогической школы (Г. Фриделя, П. Валлерана и др.). Оценили их и физики во главе с гениальным П. Кюри. На сегодняшний день можно выделить три области теоретической кристаллографии, которые берут свое начало в кристаллографических работах Огюста Браве, — это учение о симметрии, о решетках и о формах кристаллов (закон Браве).

Замечательное совпадение симметричных характеристик четырнадцати решеток Браве с видами голоэдрики семи кристаллографических систем (сингоний) не могло не произвести глубокого впечатления на кристаллографов. Особенно поражал параллелизм результатов, полученных сугубо теоретическим путем, с данными чисто эмпирических обобщений. Однако сам создатель решетчатой теории, как нам известно, сознавал, что установленные им закономерности не исчерпывают до конца проблемы о связи внешних

кристаллических форм с их внутренним строением. Найденные симметричные закономерности не охватили виды симметрии с неполногранными простыми формами, т. е. случаи гемиедри и тетартоэдри. Ряд физических свойств упорно не поддавался теоретическому истолкованию. В решетках Браве в связи с наличием центра инверсии нет полярных направлений, с которыми должны совпадать электрические оси кристаллов с разноименными зарядами на противоположных концах. Необъяснимым оставалось существование энантиоморфных разновидностей одного и того же кристаллического вещества с противоположно направленным вращением плоскости поляризации.

Для истолкования таких явлений Браве приписывал вышеуказанные физические особенности многоатомным «молекулам», расположенным в узлах решеток. Такие молекулы, по его мнению, должны обладать собственной симметрией, соответствующей одному из 32 видов конечной симметрии.

Однако оставалось совершенно недоказанным предположение о совпадении симметрии молекул с симметрией кристаллических полиэдров. Вызывало возражение и то обстоятельство, что, по гипотезе Браве, в кристаллических структурах элементарные частицы должны обязательно располагаться параллельно друг другу. Ряд последующих ученых в отличие от Браве стремился в своих построениях обойтись без учета собственной симметрии «элементарных частиц». Выводя симметрию бесконечной структурной системы, они основывались лишь на пространственном расположении составляющих ее частиц.

Одним из первых теоретиков, достигших в этом направлении существенных успехов, был Л. Зонке. Родившийся в семье профессора математики и названный в честь великого Леонарда Эйлера, Зонке уже с детских лет увлекался физико-математическими науками. Высшее образование он получил в Кеннигсбергском университете, где был учеником знаменитого Ф. Неймана. Пример последнего увлек даровитого юношу в область теоретической физики вообще и теоретической кристаллографии в частности. Впоследствии Зонке был профессором сперва в Карлсруе, а затем в Йене и Мюнхене. С 1888 г. он занимал кафедру физики в Мюнхенском политехникуме.

Здесь нельзя не отметить, что в 90-х годах Зонке одним из первых обратил внимание на выдающееся значение творчества Е. С. Федорова, несмотря на то что выводы русского ученого далеко превосходили его собственные достижения. Вместе с П. Гротом в 1896 г. он представил Е. С. Федорова в члены-корреспонденты Баварской Академии наук.

Главные труды Зонке относятся к кристаллографии, оптике и метеорологии. Из них наибольшее значение имеет книга «Развитие одной теории кристаллической структуры», стоящая в ряду важнейших классических трудов по кристаллографии.

Вкратце рассмотрим содержание этой работы Л. Зонке. Во введении к книге автор прежде всего формулирует свое определение кристалла и кристаллической структуры. Вслед за тем Зонке отмечает, что именно структура является первопричиной неодинаковости свойств одного и того же кристалла по разным направлениям.

Сформулировав основные положения, ученый переходит к обстоятельному историческому обзору предшествовавших взглядов на строение кристаллов, начиная от Р. Гука и кончая современниками автора. Глубокий критический анализ литературы представляет и сейчас большую ценность для историков кристаллографии. Особенно много внимания Зонке уделяет теории решетчатого строения по Браве. Он энергично протестует против ограничения, предписывавшего всем материальным точкам структуры взаимно параллельную ориентировку. При этом он ставит под сомнение правильность гипотезы об обязательном решетчатом строении для всех кристаллов вообще. «Сомнительно, — пишет Зонке, — чтобы всем кристаллам без исключения, даже не обладающим параллелепипедальной спайностью и в особенности образующим полугранные формы, можно было приписывать структуру в виде решетки».*

В качестве примера структуры, будто бы не подчиняющейся простому (сетчатому) строению, Зонке приводит узор, в котором элементарные частицы, лежащие в одной плоскости, расположены в вершинах

* *Sohncke L.* Entwicklung einer Theorie der Kristallstructur. Leipzig, 1879, S: 23.

шестиугольников, нацело покрывающих плоскость наподобие пчелиных ячеек. Такой мотив, хорошо известный в современной структурной кристаллографии, характеризует строение сеток (0001) графита. Как известно, этот узор расчленяется на две простые сетчатые системы.

В результате, исходя исключительно из понятия кристаллической однородности, Зонке рекомендует отказаться от теории решетчатого строения кристаллов. Такой отказ, как выяснилось впоследствии, был преждевременным. Сам Зонке понимал, что точки, образующие правильную систему, разбиваются на подгруппы параллельно ориентированным элементам, соответствующим узлам решеток Браве. Однако он подчеркивал то обстоятельство, что одна и та же правильная система точек охватывает как параллельные, так и повернутые относительно друг друга элементы.

Впоследствии Е. С. Федоров и последующие авторы выделяли в пространственных группах подгруппы чистых трансляций, связывающих параллельные точки системы. Такие подгруппы соответствуют решеткам Браве. Тем самым роль решеток Браве воскресла в обновленном виде.

Своим прямым предшественником Зонке считал Х. Винера, который подчеркивал, что закономерность в расположении одинаковых атомов достигается тогда, когда каждый атом окружен одинаковым образом другими атомами. Приведенный тезис не требует обязательной параллельности атомов, в связи с чем Винер нашел ряд возможных структур, по-видимому, не укладывавшихся в схему решеток Браве. Как отмечал Зонке, это был первый шаг в сторону от теории Браве. Однако Винер не дал полного вывода «нерешетчатых структур».

В то время ни Винер, ни Зонке не могли знать основной теоремы геометрической кристаллографии, известной теперь как теорема Шенфлиса—Бибераха. Ее современная формулировка такова: всякая федоровская группа имеет подгруппу параллельных переносов той же размерности, что и сама группа. Федоровской называется группа преобразований симметрии эвклидова пространства, обладающая свойствами локальной дискретности и локальной однородности. Поэтому не может существовать локально однородной системы, не

имеющей подгруппы параллельных переносов, т. е. решетки Браве.

Размышления над этими коренными вопросами строения материи впоследствии дали интересные результаты. Глобальный подход Браве и локальный подход Зонке в конечном итоге выразились в возникновении «кристаллографической геометрии» Б. Н. Делоне, начало которой было положено в 1934 г. публикацией и сегодня необычайно важной книги трех авторов Б. Н. Делоне, А. Д. Александрова, Н. Н. Падурова «Математические основы структурного анализа кристаллов».

Точки, соответствующие центрам атомов, обладают, по теоремам кристаллографической геометрии, следующими свойствами: 1) дискретностью; расстояние между любыми двумя точками больше некоторого фиксированного $r > 0$; 2) расстояние от любой точки до ближайшей к ней другой точки меньше некоторого фиксированного $R > 0$.

Такие множества точек названы (r, R) -системами Делоне. Соединяя произвольную точку (r, R) со всеми остальными, получаем звезду, названную звездой Зонке. Тогда симметрией обладают только те (r, R) -системы, у которых есть точки с равными звездами Зонке. Если число типов различных звезд Зонке конечно, то система называется федоровской и имеет подгруппу параллельных переносов, т. е. решетку Браве. Если все звезды Зонке равны, система называется правильной, если же они и параллельны, то (r, R) -система есть решетка.

Вот вкратце итог стародавней дискуссии. Однако и сегодня в этой области, нужно сказать, почти непочатый край работы. Соединение локального (Зонке) и глобального (Браве, Федоров, Шенфлис) подходов пока не привело к геометрической кристаллографической теории конденсированного состояния вещества. Вне геометрии сегодня находятся стекла, керамика, полимеры, разумная геометрическая модель, а тем более теория строения которых пока не создана.

Вернемся во вторую половину XIX в. Строго математический вывод бесконечно протяженных правильных систем точек и законов симметрии дал в 1868—1869 гг. известный французский математик К. Жордан в «Мемуаре о группах движений». Он задался целью вывести все возможные группы движений и найти со-

ответствующие им возможные типы систем точек. Последние в результате движений занимают в пространстве различные положения, однако вся система при этом совмещается сама с собой.

Будучи чистым математиком, Жордан ограничился общим выводом, без применения полученных результатов к физическим и кристаллографическим объектам. Им были выведены 174 группы движений, как для прерывных, так и для непрерывных систем.

Зонке, рассматривая кристаллы как прерывные правильные системы материальных точек, пришел к выводу, что из 174 групп движений сто с лишним не имеют отношения к кристаллической теории структуры. Сюда он отнес все группы с бесконечно малыми движениями, образующие не дискретные системы точек, а непрерывные пространственные системы. В 1930—1931 гг. академик А. В. Шубников и Г. Хееш показали значение непрерывных пространственных групп для кристаллографии. Попутно отметим, что теория непрерывных групп преобразований, начиная с К. Жордана, а затем трудами С. Ли, Э. Картана, Г. Вейля и многих других выдающихся математиков XX столетия превращена в новое научное направление современной математики. Многочисленные приложения этой теории касаются главным образом теории дифференциальных уравнений, дифференциальной геометрии, теоретической физики и т. п.

Изложение своих собственных взглядов Зонке начинает с гипотезы, положенной в основу его теоретических построений. Он пишет: «В нижеследующем геометрическом исследовании кристалл заменен дискретной системой материальных точек, между которыми всегда имеются маленькие расстояния». Под «материальными точками» подразумеваются центры тяжести химических молекул, сложенных из атомов, или даже агрегаты молекул. При этом весь кристалл уподобляется бесконечно протяженной системе. Сама основополагающая гипотеза формулируется следующим образом: «Кристаллы, мыслимые как неограниченные тела, являются правильными бесконечными системами точек, т. е. такими, в которых вокруг каждой материальной точки все остальные расположены так же, как вокруг каждой другой материальной точки». Тем самым

«кристалл является конечным куском бесконечной правильной системы точек».*

Для наглядности представления правильной системы Зонке прибегает к следующему приему. Какую-либо точку системы он соединяет со всеми остальными точками прямыми линиями (лучами). Такое же построение применяется и по отношению ко всем другим точкам. В результате все точки системы заменяются пучками лучей. В связи с одинаковым распределением точек правильной системы вокруг каждой точки все такие пучки связей будут одинаковыми. Все они, согласно Зонке, должны быть совместимо-равными (конгруэнтными). Тем самым совмещения этих пучков могут быть достигнуты с помощью какого-либо движения, совмещающего саму с собой и всю систему. Такими движениями могут быть параллельные перемещения, повороты и винтовые движения вокруг некоторых прямых линий — осей системы.

Задача, которую поставил перед собой Зонке, заключалась в полном выводе совокупностей таких движений, т. е. в выводе симметричных законов для правильных систем точек. Однако он ограничил свою задачу, считая, что для совмещения этих систем достаточно лишь движений, т. е. симметричных преобразований первого рода.

Симметричные преобразования второго рода (отражения) им не были приняты во внимание. Свой вывод групп движения Зонке открывает определениями трансляции, поворота вокруг оси и винтового движения. Вслед за тем Зонке приводит ряд ныне общеизвестных теорем, относящихся к сложению принятых им во внимание элементов симметрии, — трансляций, простых и винтовых осей.

В главе о возможных видах осей и их ориентировках в правильных системах точек просто доказываются теоремы о наличии в таких системах лишь двойных, тройных, четверных и шестерных осей, как простых, так и винтовых и т. д. В результате построений Зонке удалось вывести 65 групп симметрии для правильных систем точек.

Третий раздел книги содержит сопоставление теории с опытными данными, главным образом теми гео-

* Там же, с. 27, 28.

метрическими и физическими свойствами, которые не объяснялись решетчатой теорией. Особенный интерес представляет параграф, в котором Зонке связывает вращение плоскости поляризации в кристаллах с наличием в их структуре винтовых осей симметрии. Поводом к такому заключению послужило интересное открытие Е. Рейша, относящееся к 1869 г. Рейш накладывал друг на друга большое число (12—13) тонких листочков двуслойной слюды, так что плоскость оптических осей каждого вышележащего листочка была повернута по направлению часовой стрелки (или против нее) на 120° относительно аналогичной плоскости нижележащего листочка. Полученные в результате комбинации слюдяных пластинок вращали плоскость поляризации соответственно вправо или влево, напоминая тем самым правовращающие и левовращающие кристаллы кварца.

Этот замечательный опыт натолкнул Зонке на идею о наличии в структуре кварца тройных винтовых осей (правых или левых), а одновременно и на вывод о возможной роли винтовых осей в кристаллических структурах.

В конце XIX в. на авансцену мировой кристаллографии вступает наш великий соотечественник русский кристаллограф Е. С. Федоров. Он родился 10 декабря 1853 г. в Оренбурге. Вскоре после рождения родители перевезли его в Петербург. Способности мальчика проявились очень рано, и, не ожидая окончания гимназии, он в 1869 г. проходит конкурсные испытания в Инженерном училище, которое и оканчивает в 1872 г. Далее Е. С. Федоров поступает на 2-й курс Технологического института и, не окончив его, занимается самообразованием. Задуманное им в 16-летнем возрасте грандиозное сочинение «Начала учения о фигурах» близится к концу, и, будучи 27-летним семейным человеком, он поступает на 3-й курс Горного института, который и оканчивает в 1883 г. Здесь он обращает на себя внимание академика А. В. Гадолина, который способствует изданию труда Е. С. Федорова в Записках Минералогического общества в виде отдельного тома (1885 г.). В этой работе содержатся ростки всех основных направлений современной геометрической кристаллографии: теории симметрии, теории разбиений пространства. Несмотря на отсутствие поддержки со стороны

Ученого совета Горного института, он продолжал свои изыскания по геометрии, которые увенчались блестящим успехом — выводом 230 групп движений «кристаллического» пространства (1890 г.), названных впоследствии федоровскими.

Во время службы в Геологическом комитете в 1891 г. он «попутно» изобретает два замечательных прибора — двуокружной универсальный гониометр и теодолитный столик для микроскопа. Последний совершил переворот в петрографии. После непродолжительного, но болезненно переносимого пребывания на Урале (Богословский округ) в качестве практического горного инженера с 1895 г. Е. С. Федоров становится профессором геологии в Московском сельскохозяйственном институте. С осени 1896 г. он читает лекции по кристаллографии в Горном институте, специально приезжая из Москвы в Петербург два раза в неделю! Так продолжается до 1900 г. В том же 1896 г. Федорова избирают членом-корреспондентом Баварской Академии наук. Одновременно он заканчивает огромную работу «Regulare Plan und Raumtheilung»* (1899 г.), предопределившую развитие геометрической кристаллографии на много десятилетий вперед. В 1901 г. ему присуждена степень доктора минералогии и геологии Московского университета. В 1905 г. Евграф Степанович избран директором и ординарным профессором Горного института. Будучи во главе этого института, он активно разрабатывает теорию кристаллохимического анализа и некоторые «кристаллографические разделы» проективной и синтетической геометрии. Свидетельством международного признания явилось его избрание почетным членом Минералогического общества в Лондоне (1910), иностранным членом Академии наук в Риме (1910 г.), почетным членом Французского минералогического общества (1912 г.). В 1914 г. Женевский университет присудил ему степень доктора физических наук (*honoris causa*) и наконец 15 января 1919 г. он стал академиком Российской Академии наук. Однако дни его были сочтены. 21 мая 1919 г. его не стало.

В 1885 г. Е. С. Федоров в своей первой большой монографии «Начала учения о фигурах» впервые четко

* Федоров Е. С. Правильное деление плоскости и пространства. Л., 1979.

указал на неполноту вывода Зонке. В четвертом разделе этой книги содержится ряд положений, относящихся к правильным системам точек. В последующие годы Е. С. Федоров приступил к выводу всех правильных систем фигур (точек) и соответственных законов симметрии, относящихся как к «простым системам» (группам Зонке), так и к «двойным системам» (собственно федоровским). В 1890 г. были опубликованы отдельные оттиски его «Симметрии правильных систем фигур», содержащие полный вывод 230 пространственных групп.

О том, как ценил Е. С. Федоров вывод О. Браве — своего выдающегося предшественника, свидетельствуют красноречивые слова, открывающие классический федоровский труд: «Точному геометрическому изучению фигур должно предшествовать изучение точек, поэтому и в этой области представление о правильных системах фигур развилось в точные математические понятия, когда вместо них Браве задался правильными системами точек. Однако и здесь, как и в учении о симметрии конечных фигур, основатель теоретической кристаллографии несколько сузил основное определение, ограничившись лишь тем видом правильных систем точек, который получил впоследствии название пространственных решеток».*

История вывода Федоровым правильных систем фигур теснейшим образом переплетается с выводом пространственных групп А. Шенфлиса. Здесь мы встречаемся с почти одновременным решением одной и той же задачи двумя учеными, работавшими независимо друг от друга и шедшими своими оригинальными путями. Такие случаи хорошо известны и неоднократно повторялись в истории науки. Напомним хотя бы знаменитый спор о приоритете Ньютона и Лейбница в открытии дифференциального исчисления.

А. М. Шенфлис родился в Ландсберге на Варте. С 1870 г. он изучал физико-математические науки в Берлинском университете, полный курс которого закончил в 1877 г., получив докторскую степень. С 1878 г. Шенфлис становится гимназическим преподавателем математики сперва в Берлине, а затем в Коль-

* Федоров Е. С. Симметрия правильных систем фигур // Зап. СПб. минер. общ-ва. 1891. Т. 28. С. 1.

маре (Эльзас). В 1889 г. он защищает диссертацию в Геттингене, а в 1892 г. он получает должность сверхштатного профессора.

В широких кругах педагогов и студентов большую популярность получило его руководство «Введение в математическое изложение естественных наук» (1895 г.). Впоследствии эта книга переиздавалась в соавторстве с В. Г. Нернстом (в русском переводе она вышла в 1907 г. под названием «Основания высшей математики»).

В 1886 г. в работе «Геометрия движения в синтетическом изложении» Шенфлис дал обширный обзор геометрической кинематики. Вслед за тем появился ряд его работ о группах движения и деления пространства на равные части. Эти работы и послужили основой для дальнейшего полного вывода 230 пространственных групп.

Полное изложение геометрической кристаллографии с результатами упомянутого вывода А. Шенфлис дал в своей главной работе «Кристаллографические системы и кристаллографические структуры», изданной в 1891 г. После общеизвестных достижений рентгеноструктурного анализа по расшифровке законов организации кристаллических тел в 1923 г. Шенфлис заново издал свой главный труд в существенно обновленном виде под названием «Теория кристаллической структуры».

Публикации первого издания книги Шенфлиса предшествовала обширная переписка с Е. С. Федоровым. В первом же письме от 14 декабря 1889 г. немецкий ученый писал: «Высказываю большую радость по поводу совпадения моих воззрений с Вашими собственными — меня особенно радует то, что я с моей теорией не остаюсь больше в одиночестве. . . Охотно признаю приоритет за Вами. Этот вопрос вообще не стоит на первом плане».*

В последующих письмах оба корреспондента обсуждают полученные результаты, вносят поправки, дополнения и сокращения. В одном из писем Е. С. Федорова впервые появляется упоминание о 230 системах («По моему вычислению, имеется, следовательно, 230 систем»). В своей книге Шенфлис неоднократно

* Научное наследство. Т. 2. М., 1951, с. 315.

цитирует Федорова, указывая на его первенство в ряде вопросов теоретической кристаллографии: «Необходимость развивать теорию Зонке так, как этого требует в строгом смысле структурная теория, была впервые выдвинута Е. С. Федоровым». И далее: «Сочинение Федорова, содержащее полный вывод всех пространственных групп и их отношение к симметрии кристаллов, появилось на русском языке в 1890 году под заглавием „Симметрия правильных систем фигур“».*

Об особенностях и характерном различии работ Е. С. Федорова и А. Шенфлиса дает представление следующее высказывание академика Н. В. Белова: «Сопоставление двух выводов — Е. С. Федорова и А. Шенфлиса — показывает принципиально различный подход к вопросу обоих ученых. Для Шенфлиса — это лишь интересный случай вошедшей тогда в моду общей теории групп, для Федорова — инструмент изучения правильных систем фигур, к которым сводится внутренняя сущность кристалла».**

Напомним, что этим ученым посчастливилось дожить до экспериментального подтверждения теоретически выведенных ими законов бесконечной кристаллографической симметрии. А. Шенфлис, переживший Е. С. Федорова на 9 лет, в своей обновленной книге не раз напоминает об этом замечательном триумфе научного предвидения.

Наряду с именами Е. С. Федорова и А. Шенфлиса, далеко продвинувших структурную теорию Браве, стоит имя английского ученого В. Барлоу, опубликовавшего в 1894 г. свой оригинальный вывод пространственных групп. Однако почетное место в истории кристаллографии Барлоу занимает не благодаря этой запоздавшей на четыре года публикации, а в связи со своими работами, продемонстрировавшими роль плотнейших шаровых упаковок в теории кристаллических структур. В них английский ученый выступает прямым предшественником создателей современной теоретической кристаллохимии, базирующейся на принципе плотнейших упаковок атомных и ионных сфер действия. За-

* *Schoenflies* A. Kristallsysteme und Kristallstruktur. Leipzig, 1891, S. IV.

** *Белов Н. В.* Е. С. Федоров // Федоровская сессия по кристаллографии М.; Л., 1959, с. 5—8.

ложенные В. Барлоу начала учения о шаровых укладках были в наше время блестяще развиты в трудах Л. Полинга и в особенности в основополагающей монографии академика Н. В. Белова «Структура ионных кристаллов и металлических фаз» (1947 г.).

В. Барлоу родился в семье частного предпринимателя, занимавшегося строительством в Лондонских пригородах. Получив домашнее образование, он вначале помогал своему отцу, а после его смерти сам возглавил строительные работы. В некрологе ученого отмечается, что это дело велось с большим успехом, однако оставляло достаточно времени для самостоятельных научных занятий.

Узкопрактические задачи натолкнули его на глубокие чисто геометрические проблемы, связанные с теоретической кристаллографией. «Его незаурядное геометрическое видение, развитое практикой, было обязано последней больше, чем любым общепринятым академическим методам», * — замечает по этому поводу Л. Спенсер.

Кроме того, Барлоу был искусным мастером, умело вырезавшим из дерева и других материалов нужные ему детали. В связи с этим мастерская, где он конструировал свои модели, с течением времени переросла в фабрику игрушек. Множество изготовлявшихся здесь шариков различных цветов и размеров, тысячи правых и левых кукольных рук послужили отличным материалом для построения наглядных моделей правильных систем фигур. В его статье 1897 г. на рисунках, изображающих законы симметрии пространственных групп, даны изображения правых и левых рук, моделирующие правизну и левизну фигур, их повороты и перемещения. В наше время изображения черных и белых «перчаток» были использованы А. В. Шубниковым при моделировании законов антисимметрии. После 1888 г. Барлоу посещал кристаллографические классы в Лондонском центральном техническом колледже, где читали лекции профессора Х. Д. Мирс и В. И. Поп.

Во время поездки за границу Барлоу познакомился в Мюнхене с маститым П. Гротом, охотно помещавшим в своем «Кристаллографическом журнале» его

* *Spencer L. J. Barlow (William) // Min. Mag. 1936. Vol. 24, N 153. P. 278.*

статьи. В письме к Е. С. Федорову от 13 июня 1895 г. П. Грот писал: «В настоящее время меня посетил г-н Барлоу, очень приятный человек, одушевленный большим усердием к науке». * Следует отметить, что Федоров высказал ряд критических замечаний в адрес английского ученого по поводу его вывода пространственных групп.

Первая статья Барлоу «Возможная природа внутренней симметрии кристаллов» (1883 г.) уже трактовала вопрос о возможных группировках атомов в кристаллических структурах. Через два года была издана его книга «Новые теории о материи и силе». В 1894 г. появилась статья Барлоу «О геометрических свойствах гомогенных твердых структур и их применении к кристаллам» с новым выводом 230 пространственных групп. В 1898 г. вышла в свет статья на английском и немецком языках «Механическая первопричина гомогенности структуры и ее симметрии».

В этой статье Барлоу обновляет старинные концепции Кеплера, Гука, Гюйгенса, Ломоносова, Волластона и других. Кристаллические структуры им уподоблялись плотнейшим упаковкам шаров, как одинаковых, так и различных по размерам. В начале этого обширного мемуара автор дает понятие о своих взглядах на структуру кристаллов. Далее статья содержит пространное изложение геометрии шаровых упаковок. Само собой разумеется, что начинается оно с задачи плотнейших упаковок равных шаров. В результате решения такой задачи Барлоу устанавливает наличие двух наиболее симметричных плотнейших шаровых упаковок: кубический и гексагональной. Первая соответствует кубической центрогранной решетке Браве. Плотнейшая (двуслойная) гексагональная упаковка, столь известная в настоящее время, была впервые выведена В. Барлоу и появилась в его статье 1897 г. Она состоит из двух гексагональных решеток Браве, вдвинутых друг в друга.

В дальнейшем автор переходит к задаче построения структуры из шаров двух размеров, предвосхищая расшифрование через 15 лет структуры типа хлористого натрия. В настоящее время, как известно, в основе

* Грот П. Письма к Е. С. Федорову // Кристаллография. Вып. 3. Л., 1955, с. 47.

современной структурной кристаллографии и нынешнего рентгеноструктурного анализа лежат пространственные группы Федорова—Шенфлиса. Однако нельзя забывать того, что каждая пространственная группа характеризуется прежде всего своей подгруппой чистых трансляций, т. е. решеткой Браве. Особенно наглядно это выражается в современных общепринятых формулах пространственных групп (формулы Германа—Могэна), в которых на первом месте стоят большие латинские буквы, обозначающие соответственные решетки.

Говоря о дальнейшем развитии идей Браве, нельзя не остановиться на оригинальной, основанной на учении Е. С. Федорова о параллелоэдрах классификации пространственных решеток, выполняющих пространство при условии их равенства, параллельной ориентировки и смежности по целым граням. Четырьмя идеальными параллелоэдрами являются куб, ромбододекаэдр, кубооктаэдр, гексагональная призма с пинакоидом. Все менее симметричные параллелоэдры выводятся из четырнадцати идеальных путем однородных деформаций — растяжений и сдвигов.

Исходя из выполнения пространства параллелоэдрами и выделяя в них центральные точки, Е. С. Федоров пришел к заключению, что все простые кристаллические решетки при помощи растяжений или сдвигов можно вывести из четырех основных решеток, соответствующих четырем типам идеальных параллелоэдров. Три из них: гексаэдрическая (примитивная), октаэдрическая (центрированная), додекаэдрическая (центрогранная) являются кубическими, четвертая (призматическая) — гексагональная. Следовательно, мир кристаллов делится на два типа: кубический и гексагональный.

Рассмотрим отдельные ветви геометрической кристаллографии, основанные на результатах Браве.

Решетки Браве в современной кристаллографии

Теория кристаллических решеток, помимо роли фундамента, на котором выросло здание федоровских групп, сыграла огромную роль и сама по себе. С одной стороны, теория решетчатого строения, будучи, по сути, тесно связанной с теорией квадратичных форм, что было отмечено и в работах О. Браве, породила в конечном итоге геометрическую теорию чисел. Помимо Лаг-

ранжа и Зеебера, выдающихся результатов в этой области достигли такие ученые, как Л. Дирихле, Г. Минковский, Г. В. Вороной.

Л. Дирихле, происходя из французской эмигрантской семьи, с 1822 по 1827 г. жил в Париже, где был, в частности, знаком с Фурье и многими профессорами Политехнической школы. Затем по приглашению А. Гумбольдта он переехал в Германию и в 1855 г. стал преемником К. Ф. Гаусса в Геттингене. Крупный математик Г. Минковский так охарактеризовал близкого по духу коллегу: «Он обладал искусством соединять с минимумом слепых формул максимум зрячих мыслей».*

Учебник Дирихле «Теория чисел», изданный Дедекиндом, сыграл огромную роль, послужив затравкой для возникновения геометрической теории чисел в трудах Г. Ф. Вороного и Г. Минковского. Самому Л. Дирихле принадлежит определение «области Дирихле—Вороного», играющей фундаментальную роль в геометрической кристаллографии. Именно им дана геометрическая трактовка теоремы бинарных и тернарных форм. По словам Б. Н. Делоне: «Дирихле в работе 1848 года дает наконец геометрическое доказательство того, что приведение Лагранжа и Зеебера состоит в выборе репера, составленного тремя последовательными минимумами, и что в 2- и 3-мерном случае такой репер всегда является основным репером решетки».**

Геометрический метод Гаусса—Дирихле был подробно проанализирован Г. Смитом, крупным английским математиком, к сожалению, мало известным на континенте. Методы геометрической теории чисел были развиты трудами Г. Ф. Вороного и Г. Минковского, оставивших свой след на всем дальнейшем развитии этой науки.

Г. Ф. Вороной родился в семье профессора русской словесности Нежинского лицея. Гимназию окончил в Прилуках и в 1885 г. поступил в Петербургский университет. После защиты магистерской диссертации

* Клейн Ф. Лекции о развитии математики в XIX столетии. М.; Л., 1937, с. 132.

** Делоне Б. Н., Галиулин Р. В., Штогрин М. И. Теория Браве и ее обобщение на n -мерные решетки // Браве О. Кристаллографические этюды. Л., 1974, с. 336.

Г. Ф. Вороной получил профессуру в Варшавском университете, в котором и проработал всю свою жизнь.

Его основные результаты по геометрии чисел и по решеткам заключены в обстоятельной работе «Исследования о примитивных параллелоэдрах» (1908 г.). Отсюда и пошло стандартное название «области Дирихле—Вороного». Здесь пересеклись интересы и кристаллографии (параллелоэдры Федорова) и теории чисел. Г. Ф. Вороным доказано, что при каждом конечном n (n — размерность пространства) существует конечное число параллелоэдров. Более того, Г. Ф. Вороной дал алгоритм построения всех типов примитивных параллелоэдров.

Честь быть основоположником геометрической теории чисел Г. Ф. Вороной делит с Г. Минковским, выдающимся немецким математиком. Г. Минковский родился в Алексотах (Россия), но вместе с родителями переехал в Кеннигсберг (ныне Калининград). Обучался в Кеннигсберге и Берлине. В статье «О положительных квадратичных формах и об алгоритме, подобном алгоритму непрерывных дробей» (1894 г.) Г. Минковский вслед за Гауссом и Дирихле рассматривал числовые решетки любого числа переменных и в 1896 г. издал книгу «Геометрия чисел». Он оставил след в геометрии выпуклых тел, в теории многогранников. Им доказана весьма трудная теорема о том, что параллелоэдр всегда имеет центр симметрии.

Большой вклад в развитие этого направления внесли русские математики А. Н. Коркин, Е. И. Золотарев, А. А. Марков и многие другие. Развитие этой теории связано также с именами наших соотечественников Б. А. Венкова и Б. Н. Делоне. Отталкиваясь от результатов своих предшественников, еще в 1932 г. Делоне, анализируя 14 решеток Браве и их разбиение на области Дирихле—Вороного, вывел 24 метрических сорта таких разбиений. Метод Делоне использован в международном справочнике по структурной кристаллографии («Crystall data»). Им совместно с Н. Н. Сандаковой построена законченная теория правильных разбиений Дирихле n -мерного евклидова пространства, дан конечный алгоритм для определения топологии и метрики этих разбиений для любых размерностей пространства. Дальнейшее развитие этой теории связано главным образом с трудами учеников Б. Н. Делоне—

С. С. Рыжкова, Е. П. Барановского, М. И. Штогрин, Р. В. Галиулина.

В трудах Б. Н. Делоне геометрическая теория чисел приобрела естественную, органичную связь с решетками Браве и получила завершение в работе «Теория Браве и ее обобщение на n -мерные решетки», написанную им совместно с его учениками Р. В. Галиулиным и М. И. Штогриным (1974 г.). Она была опубликована (и это весьма симптоматично) вместе с русским переводом «Кристаллографических этюдов» самого Браве. Тем самым труды родоначальника теории кристаллических решеток теперь всегда соседствуют, находясь в одной обложке, с наиболее серьезной работой по развитию теории решеток арифметическими методами. В самом начале этой публикации советских ученых сказано следующее: «Главное достижение Браве — разбиение решеток на 14 типов и вывод так называемых параллелепипедов Браве для этих типов — имеет огромное значение для всей кристаллографии. Эта работа может быть поставлена в один ряд только с такими замечательными достижениями, как вывод 32 кристаллических классов, 47 простых форм и 230 пространственных групп».*

Теория решеток Браве развивалась с целью вывода многомерных федоровских групп. Основы общей теории многомерных федоровских групп заложены специалистами-математиками. В 1910 г. Л. Бибербах установил конечность числа неизоморфных федоровских групп в n -мерном евклидовом пространстве, используя арифметический вариант подхода А. Шенфлиса. Этот же результат с позиций аффинной эквивалентности был доказан Г. Фробениусом в 1911 г., а в 1912 г. Бибербах обобщил теорему Шенфлиса о том, что всякая группа любой размерности n имеет n -мерную подгруппу параллельных переносов.

Только в 1948 г. Г. Цассенхауз, исходя из результатов Бибербаха и Фробениуса, построил с помощью четырехмерных точечных групп алгоритм вывода четырехмерных дискретных групп движений евклидова пространства с конечной фундаментальной областью, основанный на расширении трансляционных подгрупп, т. е. групп движений четырехмерных решеток. Через год

* Там же, с. 309.

С. Герман сформулировал основную проблему многомерной геометрической кристаллографии как задачу отыскания всех групп симметрии, переводящих в себя n -мерную трансляционную решетку, и разработал рациональную систему обозначений для элементов симметрии четырехмерных пространственных групп, принятую впоследствии (1971 г.) и в нашей стране.

Таким образом, задача вывода групп, как и в случае трехмерного пространства, была разделена на вывод групп симметрии с неподвижной точкой и вывод четырехмерных решеток Браве.

В 1951 г. А. Харли, основываясь на трудах Э. Гурса, Д. Робинсона, С. Германа, выделил 222 четырехмерные точечные кристаллографические группы. В 1965 г. И. Небюзер и Г. Вондрачек вывели 227 таких групп, используя машинные методы счета. В этом же году Е. Дейд нашел 9 максимальных точечных групп в четырех измерениях, из которых с помощью ЭВМ коллектив авторов в составе А. Харли, И. Небюзера и Г. Вондрачека вывели полный и окончательный список всех 227 точечных кристаллографических групп в четырех измерениях и 710 арифметических классов (аналогов симморфных федоровских групп в четырех измерениях). Параллельно шла работа по поиску четырехмерных решеток Браве. Надо отметить, что окончательное их число (64 решетки) удалось установить далеко не сразу.

Опираясь на работы С. Германа и А. Харли, А. Маккей и Г. С. Поли в 1963 г. вывели 52 четырехмерные решетки Браве. А. М. Заморзаев и Б. В. Цекиновский исключили из этого списка две центрированные решетки, но вместо них добавили две другие, тоже центрированные решетки. Затем Т. С. Кунцевич и Н. В. Белов в публикациях 1968 и 1970 гг. довели число четырехмерных решеток Браве до 55. Полное число решеток Браве (64) было установлено Р. Бюловым, И. Небюзером, Г. Вондрачком в 1971 г. при выводе арифметических классов. В этом же году Т. С. Кунцевич и Н. В. Белов вывели четырехмерные пространственные группы низших систем. Полный вывод всех неизоморфных четырехмерных федоровских групп был реализован на ЭВМ коллективом из пяти авторов (Г. Брауном, Р. Бюловым, И. Небюзером, Г. Вондрачком, Г. Цассенхау-

зом) в 1973 г. С учетом энантиоморфных групп их оказалось 4895.

История вывода четырехмерных решеток Браве, да и групп симметрии является поучительным примером резкого возрастания сложности задачи Браве при росте размерности решетки.

Для пятимерных решеток Браве пока еще практически ничего не известно, однако работы в этой области ведутся в рамках школы Б. Н. Делоне его учениками С. С. Рыжковым и Е. П. Барановским. Так, С. С. Рыжков нашел 17 неэквивалентных максимальных пятимерных групп, что несомненно большое достижение. Методы геометрической теории чисел и теория четырехмерных федоровских групп имеют много точек соприкосновения, причем главнейшие из них — это решетки Браве.

Закон Браве

Первое пояснение разнообразия появляющихся кристаллических форм одного и того же вещества дал Р. Ж. Гаюи в «Теории убывания» (1784 г.), однако только О. Браве в 1850 г. создал, по всей видимости, и по сегодняшний день наиболее приемлемую модель, основанную на предложении, что «чем больше ретикулярная плотность данной плоскости сети, тем чаще она встречается в качестве реальной грани на кристаллах данного вещества».*

Дальнейшее уточнение этого эмпирического правила принадлежит П. Кюри. Великий ученый родился в Париже, в семье врача. Получив домашнее образование, он затем прослушал курс лекций в Сорбонне и в восемнадцатилетнем возрасте получил степень лиценциата физики. В девятнадцать лет он уже лаборант факультета точных наук Парижского университета. С 1883 г. П. Кюри преподает в Школе физики и химии, а с 1904 г. он стал профессором Парижского университета. Его трагическая смерть 19 апреля 1906 г. под колесами телеги — огромная невосполнимая потеря для всей мировой науки.

* Браве О. Кристаллографические этюды. Л., 1974, с. 189.

П. Кюри написал всего лишь 14 статей по кристаллографии, но каждая из них — шедевр. Его связь с творческим наследием О. Браве прослеживается по двум линиям — в его статьях о симметрии и теории кристаллов. В 1885 г. в небольшой статье «О формировании кристаллов и о капиллярных постоянных для их различных граней» П. Кюри сформулировал известный кристаллографический тезис, согласно которому кристалл или совокупность граней, находящихся в равновесии с маточным раствором, стремится принять такое внешнее огранение, при котором поверхностная энергия имеет наименьшее значение. Будучи продолжателем дела Браве по кристаллографии, П. Кюри был еще и физиком. Это привело к другой, как бы дополняющей подход Браве постановке вопроса о законах формирования огранения реальных кристаллов. Сопоставление гипотезы О. Браве с теоретическим подходом П. Кюри было осуществлено Л. Зонке в 1888 г.

Совершенно по другому, исходя из термодинамических соображений, подошел к этой же задаче Д. В. Гиббс. Крупнейший американский ученый родился в Нью-Хейвене, в семье, в которой высоко чтит классическое (гуманитарное) образование. Окончив в 1858 г. колледж, он поступает в Йельский университет и через пять лет, после успешной защиты диссертации, становится доктором философии. В 1866 г. он едет в Европу, где посещает лекции таких знаменитых ученых, как Шаль, Дарбу, знакомится с трудами Лагранжа, Коши и другой математической и физической классикой. В Берлине он занимается в основном физикой и механикой — знакомится с работами Гаусса, Якоби, Гамильтона и др. После возвращения он навсегда поселяется в отцовском доме и, будучи профессором Йельского университета, ведет уединенный образ жизни, редко покидая родной город.

В статье «О равновесии гетерогенных веществ» (1878 г.) он, совершенно независимо от европейских ученых, закладывает основы термодинамической теории роста кристаллов, согласно которой минимальность $\sum \sigma_i S_i$ (где σ_i — истинное поверхностное натяжение i -й грани кристалла, а S_i — ее площадь) есть условие термодинамического равновесия формы кристалла. Теперь этот принцип принято называть принципом Гиббса—Кюри—Вульфа.

Г. В. Вульф родился в Нежине, в семье директора гимназии. После окончания Варшавского университета он был командирован за границу, где познакомился с ведущими физиками и кристаллографами Европы, в частности с патриархом немецких кристаллографов П. Грошем. Вернувшись в Россию, Г. В. Вульф стал приват-доцентом Варшавского университета. В 1895 г. он закончил классическую работу «К вопросу о скоростях роста и растворения кристаллических граней», защищенную в следующем году в Новороссийском университете в качестве докторской диссертации. С 1908 г. по приглашению В. И. Вернадского он начал работать в Московском университете, с 1911 г. — в Народном университете. После Октябрьской революции он вернулся в Московский университет и в 1921 г. был избран членом-корреспондентом Академии наук. Его преждевременная кончина в 1925 г. — огромная невосполнимая утрата для всей отечественной науки. Его ученики академик А. В. Шубников и профессор Е. Е. Флинт основали в нашей стране новое научное направление — физическую кристаллографию.

В работе 1895 г. Г. В. Вульф развил теоретические положения Д. Гиббса и П. Кюри и сформулировал утверждение, согласно которому минимум поверхностной энергии монокристаллического многогранника (при заданном фиксированном объеме) достигается при таком взаимном расположении его граней, когда они удалены от одной и той же точки — теперь называемой точкой Вульфа — на расстояния, пропорциональные их капиллярным постоянным. Отсюда следует, что скорости роста граней пропорциональны удельным поверхностным энергиям этих граней относительно маточного раствора.

Более строгая аргументация в пользу этого утверждения принадлежит Г. Хилтону (1903 г.) и Я. И. Френкелю (1934 г.). На этой же идее построена замечательная статья Л. Д. Ландау «О равновесной форме кристаллов», являющаяся как бы завершением физического подхода к развитию идеи О. Браве. Наиболее явно это выражено словами Г. В. Вульфа «Кристалл есть среда, а не многогранник».

Исследование Г. В. Вульфа 1895 г. породило другое, чисто геометрическое направление исследования. В статье «К теории габитуса кристаллов» (1908 г.)

ученый развил элегантную теорию и вывел 17 теоретических габитусов (форм) кристаллических многогранников, совпадающих с областями Дирихле—Вороного пространственных решеток. В 1934 г. Б. Н. Делоне, используя аппарат геометрической кристаллографии, окончательно установил существование 24 областей Дирихле—Вороного и, тем самым, 24 теоретических габитусов Вульфа.

Результаты, полученные в теории Гиббса—Кюри—Вульфа, служили поводом для оживленных дискуссий, например по проблеме вициналей (П. Эренфест, 1915 г.), и в конечном итоге привели к некоторым ограничениям в ее применении (только к статически равновесным формам). Такой подход и сегодня не потерял своей актуальности. С другой стороны, весь этот круг идей породил в кристаллографической литературе два новых научных направления, одно из которых связано с именем нашего великого соотечественника Е. С. Федорова, а другое — с трудами многочисленного интернационального коллектива ученых: П. Ниггли, И. Донней, Д. Харкер, И. И. Шафрановский, В. И. Михеев, В. А. Франк-Каменецкий и др. С минералогической и кристаллографической точек зрения к этому вопросу подошли Е. Маллер (1879 г.) и Ж. Фридель (1904 г.). Весь этот комплекс понятий привел Е. С. Федорова к осознанию принципов кристаллохимического анализа и изучению зависимости формы кристаллов от его строения и состава.

По идее Е. С. Федорова, кристаллохимический анализ позволяет получить общее представление о внутреннем строении кристаллического вещества по гониометрическим данным о его форме. Кристаллохимический анализ основан на законе постоянства углов и теории параллелоэдрического строения вещества. По Е. С. Федорову, все простые кристаллические решетки можно с помощью расстояний и сдвигов (аффинными деформациями) вывести из четырех решеток, соответствующих четырем типам идеальных параллелоэдров.

Исходя из закона О. Браве, по которому на кристаллах статистически преобладают грани, наиболее плотно усаженные атомами (молекулами), слагающими кристалл, Е. С. Федоров вывел возможность определения типа решетки по внешней форме кристалла. Обобщение всего накопленного в литературе грандиозного

материала по измерению кристаллов было выполнено Е. С. Федоровым и положено в основу монументальной монографии «Царство кристаллов» (*Das Krystallreich*) (1920 г.). До открытия рентгеноанализа этот путь был единственным. К сожалению, он применим только к весьма простым веществам. Впоследствии многие авторы, например А. К. Болдырев (СССР), Т. Баркер, М. Портер, Р. Шпиллер (Англия), И. С. Меллон (Франция), упростили процедуры кристаллохимического анализа и придали ему несколько иной смысл.

В 1919 г. П. Ниггли предложил вместо ретикулярных плоскостей использовать «физическую плотность» сеток (граней), учитывающую атомные веса или порядковые номера слагающих их атомов. Позднее им выполнены работы по сопоставлению реальных структур и статистики появления соответствующих им граней, введено понятие «серийных клеток» и т. п. И. Донней и Д. Харкер в 1939 г. установили связь между площадями граней и симметрией структуры и видоизменили закон Браве. По их мнению, морфологическое значение грани кристалла обратно пропорционально площади элементарного параллелограмма в примитивной (не центрированной) решетке при условии отсутствия винтовых осей и плоскостей скользящего отражения в пространственной группе. Влияние центрировки решетки, действие винтовых осей и плоскостей скользящего отражения приводит к замене индексов грани индексами, умноженными несколько раз.

В статье 1937 г. И. Донней и Д. Харкер на основе сформулированного ими же обобщенного закона Браве приводят 97 морфологических последовательностей граней для 230 пространственных групп. Используя таблицы И. Доннея и Д. Харкера, можно вычислить теоретические последовательности форм для любых пространственных групп, соответствующих частоте общего положения. Доннеем опубликована серия работ по сопоставлению симметрии структуры и морфологии ряда минералов.

С другой стороны, влияние на морфологию кристаллов оказывают, как это было высказано в работах П. Ниггли, О. А. Аншелес, И. И. Шафрановского и окончательно сформулировано П. Хартманом и В. Пердоком, структурно важные направления в кристаллах. Тогда важнейшие зоны кристаллов со-

ответствуют направлениям наиболее интенсивных сил связей в кристаллах, что созвучно выводам общей теории роста кристаллов (И. Странский, В. Коссель и др.).

В 1945 г. в статье И. И. Шафрановского «Демонстрация закона Браве на кристаллах циркона» впервые после П. Ниггли (1926 г.) сформулировано утверждение, что главные кристалломорфологические зоны параллельны рядам решетки с наименьшими расстояниями между частицами. Впоследствии оно было переформулировано Хартманом и Пердоком.

В том же году И. И. Шафрановский впервые полностью перечислил все 1403 структурно-гранные разновидности простых форм и установил ярко выраженную статистическую закономерность, согласно которой наиболее развитые и часто встречающиеся грани обладают наибольшими величинами бесконечной плоскостной симметрии.

Следующий шаг сделан А. Ф. Уэллсом, а также В. И. Михеевым и И. И. Шафрановским. Он заключается в учете роли среды (ее физико-химических параметров, например pH). Иными словами, была выдвинута идея о динамическом поведении одной и той же структуры в различных физико-химических средах. В статье двух последних авторов «Рентгенометрический способ определения морфологически важных граней кристаллов» (1949 г.) дано сопоставление результатов Доннея и Харкера с данными по «Рентгенометрическому определителю минералов».

В 1946 г. в работе И. И. Шафрановского «Законы развития и распределения граней на кристаллах» были проанализированы методы П. Ниггли, Доннея и Харкера и указана их взаимосвязь со структурно-гранными разновидностями простых форм почти в окончательном виде. В статье «Габитусные формы кристаллов» (1947 г.) впервые появляются 18 «тетрагональных габитусов» на основе допущения о том, что минимум важнейших по порядку граней, образующих замкнутый многогранник, обуславливает габитус кристалла. Здесь же впервые проводится их сопоставление с теоретическими габитусами Г. В. Вульфа—Б. Н. Делоне, известными по работе Б. Н. Делоне и А. Д. Александрова «Математические основы структурного анализа

кристаллов» (1934 г.). Габитусы растворения были выведены теоретически только в 70-х годах.

Наконец, в статье «Внешняя форма кристаллов как отражение их внутреннего строения», написанной совместно с В. А. Франк-Каменецким, содержится весь комплекс идей в их историческом развитии по изучению зависимости формы кристаллического тела от его структуры, включая анализ статистического метода при определении внешней формы кристаллов (по А. В. и О. М. Шубниковым) (1926 г.), результаты работ А. К. Болдырева по составлению «Определителя кристаллов» (1937—1939 гг.), В. В. Доливо-Добровольского — по классификации внешних форм (1936 г.), П. Ниггли — по морфолого-статистическим характеристикам (1926 г.), а также В. А. Франк-Каменецкого — по габитусной значимости граней и выведенным им морфолого-статистическим рядам (1946 г.).

Здесь впервые формулируется как идеология: «При статистическом исследовании кристаллов очень важно учитывать влияние окружающей среды на форму кристаллов. Большой интерес представляет вывод различных морфолого-статистических рядов для кристаллов одного и того же минерала, образовавшихся при различных условиях генезиса. При этом открывается возможность определить по форме кристалла минерала условие его образования (тип месторождения и парагенезис)». * С другой стороны: «Наиболее существенным недостатком описанных методов является то, что они, не учитывая влияние энергетических и молекулярно-кинетических факторов, рассматривают внешнюю форму лишь как следствие геометрии кристаллического строения». **

В монографии И. И. Шафрановского «Кристаллы минералов» уже отмечены все те направления развития морфологии кристаллов, которым посвящена эта публикация, и уже выкристаллизовалась мысль, справедливость которой сегодня никто не будет оспаривать: «Первенствующая роль структурной кристаллографии на некоторое время отодвинула на второй план учение

* Шафрановский И. И., Франк-Каменецкий В. А. Внешняя форма кристаллов как отражение их внутреннего строения // Вестн. ЛГУ. 1948. № 1. С. 35.

** Там же, с. 61.

о морфологии кристаллов». Форма кристаллов, рассматриваемая долгое время как ключ к разгадке кристаллической структуры, утратила свой интерес в данном отношении. Однако минералоги должны твердо помнить, что она сохранила полностью свое значение в качестве индикатора внешних условий образования минералов. Внимательное изучение реального кристаллического многогранника «может дать ценные указания о химизме минералообразующей среды, о направлении питания его токов, о ходе развития кристаллов в геологическом времени».*

В статье «Современное состояние вопроса о зависимости внешней формы от внутреннего строения кристаллов» (1959 г.) И. И. Шафрановский подводит итоги по этому направлению, уделяя особое внимание работе А. Ф. Уэллса «Габитус кристаллов и их внешняя структура» (1946 г.).

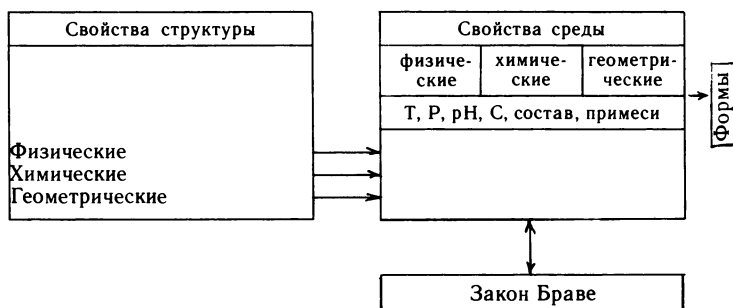
С середины 50-х годов нашего столетия данная проблема привлекает внимание широкого круга исследователей и приобретает сугубо практический характер. После того как было установлено, что форма кристалла является при прочих равных условиях индикатором условий его роста и особенностей строения, у ряда авторов, при этом следует отметить заслуги Н. З. Евзиковой, возникла идея использования морфологических характеристик кристаллов минералов в геологии. Было осознано, что зависимость формы кристаллов от минералогенетической среды дает возможность для разработки морфологических индикаторов условий минералообразования. В процессе роста кристаллического индивида его форма крайне редко остается постоянной. Например, формы кристаллов флюорита часто эволюционируют от октаэдра к кубу, затем ромбододекаэдру и далее к... гексаоктаэдру. Эти изменения в форме закрепляются в виде первичной зональности и секториальности кристаллов-минералов. Так, с середины XX в. закон Браве приобретает динамический характер. Становится очевидным, что статическая трактовка зависимости формы от структуры и условий роста не полна и удовлетворительное решение проблемы Браве возможно только при изучении динамики кристаллических форм как функции структуры и состояния минера-

* Шафрановский И. И. Кристаллы минералов. Л., 1961, с. 120.

логенетической среды. Кристаллографами и минералогами было проанализировано большое количество примеров закономерного изменения форм кристаллов-минералов, выявлены устойчивые эволюционно-габитусные ряды для некоторых минералов (касситерия, пирита, флюорита, кварца) и в общих чертах описана их зависимость от геометрии (зональности) рудных тел и ореолов минерализации. В последние годы осознана необходимость изучения динамики морфологических характеристик различных минералов, входящих в один парагенезис.

Приведенный материал свидетельствует о том, что и в наше время закон Браве продолжает играть важную роль, порождая горячие дискуссии, неожиданные точки зрения и новые толкования. Тем не менее приходится констатировать, что, несмотря на постоянные усилия в этом направлении, проблема взаимосвязи облика кристалла, его структуры и минералогенетической среды еще далека от полного решения.

И физический (П. Кюри, Д. Гиббс, Г. В. Вульф, Л. Д. Ландау), и структурный (Ж. Фридель, И. Донней, Д. Харкер, В. Пердок), и минералогенетический (Э. Малляр, И. И. Шафрановский, В. И. Михеев, В. А. Франк-Каменецкий, Н. З. Евзикова, И. Костов) подходы к решению проблемы Браве не привели к точному ее решению. Это означает, что существует некоторое эмерджентное качество системы, не сводимое к ее отдельным компонентам:



Поэтому любой локальный подход к проблеме порождает некоторую неопределенность, которая выра-

жается через отклонения теоретических и реально наблюдаемых последовательностей появления граней на кристаллическом индивиде. Наиболее ярко это свойство закона Браве проявляется при изучении кристалломорфологической эволюции минералов, в рамках которой несомненно действуют все вышеперечисленные факторы.

Возникает следующий принципиальный вопрос: вероятностный характер закона Браве — это следствие неполноты наших знаний или принципиальное эмергентное свойство кристаллического состояния. Можно придерживаться как той, так и другой точки зрения. Однако мы считаем, что неопределенность закона Браве является неустранимой. По мере более детального исследования вопроса она имеет тенденцию к уменьшению, но никогда не будет устранена полностью.

Попытка построения модели поведения минерального индивида во времени и в пространстве упирается в понимание свойств самого трехмерного евклидова пространства. Здесь нас ожидает крайне неприятный сюрприз, известный из математики: трехмерное евклидово пространство «ведет себя плохо». Оно «не коммутативно», и для него не существует числового формализма, обладающего хорошими математическими свойствами. . . Известно, что задачи, решаемые в одномерном (!) случае, с большим трудом и не всегда решаются в двумерном случае и вообще не решаются точно в трехмерном случае.*

С этим приходится считаться, хочется этого или нет.

Каковы же перспективы дальнейшего уточнения закона Браве? Изучение любого явления природы может быть примерно охарактеризовано следующей последовательностью действий, имеющей явно выраженный итерационный характер.

В общих чертах эта схема знакома каждому исследователю, если не в теоретическом, то в практическом плане. Жизнь вносит коррективы даже в такие, можно сказать, вечные схемы. Процессы накопления и формализации знаний в области кристаллографии, минералогии, минералогической кристаллографии, генетической кристаллографии идут весьма интенсивно и практически уже сегодня становится необозримыми. В каждой

* Займан К. Модели беспорядка. М., 1982.



из подобластей знаний формируется свой собственный язык представления знаний, своя терминология, свои приемы исследований. Процессы накопления и специализации знаний порождают проблему преодоления информационного шока, к которому близки большинство активно работающих исследователей. Уследить за всеми новостями, даже в узкой предметной области, стало практически невозможно. Более того, огромное количество неструктурированной информации (в частности, по генетической кристаллографии) препятствует осмыслению даже твердо установленных фактов и тенденций.

Из этого положения можно выйти только при помощи автоматизированных систем научных исследований.* Процессы компьютеризации знаний в смежных с кристалломорфологией областях геологической науки идут быстрыми темпами. В процессе создания, освоения или эксплуатации находятся автоматизированные каталоги горных пород (около 100 тыс. образцов), системы автоматизированной диагностики (автоматические

* Дубов П. Л., Орлов А. М., Шафрановский И. И. О возможностях и перспективе автоматизации гониометрических исследований в минералогии // Минерал. журн. 1987. Т. 7, № 1. С. 84—89.

дифрактометры) кристаллических структур и многое другое. На повестке дня вопрос создания сетей коллективного пользования. Здесь важно осознать следующее принципиальное положение: те разделы науки вообще и кристаллографии в частности, которые не будут компьютеризированы, со временем обречены на прозябание, как это, например, произошло с некогда славной гониометрией кристаллов. Не имея поддержки со стороны быстро развивающихся разделов кристаллографии, гониометрия, в сущности, сошла с научной сцены, и ее возрождение следует ожидать только при переходе на принципиально новую техническую базу.

В условиях компьютерного подхода последовательность процедур научного поиска претерпевает существенное изменение.



Здесь пролегает основной путь по уточнению закона Браве, выявлению всего научного и практического потенциала проблемы взаимосвязи формы, структуры и условий «бытия» минерального индивиду.

Эта задача неразрывно связана с «Кристаллогенетическим определителем минералов», создание которого является без всякого сомнения одной из важных задач минералогической кристаллографии. При создании «Кристаллогенетического определителя минералов» следует обратить особое внимание на возможность построения этого определителя на принципиально новой основе — на теории экспертных систем, что, по-видимому, является наиболее актуальной задачей завтрашнего дня.

В настоящее время уже имеется ряд предпосылок для создания кристаллогенетического определителя, представляющего собой результат дальнейшего развития федоровского «Кристаллохимического анализа». Если целью прежних определителей кристаллов было установление вещества по форме кристаллических многогранников, то новейший определитель даст возможность на основе знания внешней формы получать физико-химическую и геометрическую характеристику кристаллообразующей среды. Думается, что кристаллогенетический определитель должен в основном слагаться из двух частей. Первая (общая) часть должна состоять из таблиц, относящихся либо ко всем кристаллам вообще, либо к группам кристаллов различных сингоний и категорий. Здесь же должны содержаться данные по статистике распределения минералов по видам симметрии, сингониям и пространственным группам и статистические данные по морфологическим характеристикам кристаллических полиэдров, статистические данные о парагенезисе симметрий и форм кристаллов-минералов. Вторая (специальная) часть должна содержать сведения, относящиеся к отдельным конкретным кристаллическим веществам. Здесь должны находиться результаты анализа кристаллической структуры данного вещества с точки зрения возможности появления тех или иных граней, сведения о разнообразных габитусных формах, наблюдавшихся для различных условий образования кристаллов, таблицы с перечнем ложных форм, возможных для кристаллов соответствующего вида симметрии, и пр.

Этот краткий обзор всего научного направления еще раз наглядно показывает, как из емких и одновременно осторожных наблюдений и формулировок классиков науки вырастают целые новые направления на-

учного поиска, далеко не исчерпанные и по сегодняшний день.

В заключение рассмотрим историческую судьбу еще одного начинания Браве — на этот раз его ботанических исследований, проводимых совместно с братом Камиллом.

Симметрия подобия

Вопросы организации растений с позиций симметрии эпизодически привлекали внимание исследователей на протяжении всего XIX столетия. Однако познание соответствующего задаче математического аппарата (теории аффинных преобразований и теории подобных преобразований, как их частного случая) фатальным образом сказалось на результатах. Математиков XIX столетия не интересовали законы организации растений, а ботаники и зоологи были далеки от знания аффинной геометрии, основные положения которой были сформулированы еще Эйлером и развиты в течение всего XIX в. в стройную геометрическую теорию.

Поэтому симметричные понятия, введенные Огюстом и Камиллом Браве в описательную морфологию растений, не оказали заметного влияния как на развитие самой теории симметрии, так и на общее направление исследований в морфологии растений. Как это ни странно, в описательных разделах ботаники и зоологии большой популярностью пользовались отдельные преобразования проективной геометрии (более общей, чем аффинная) и под видом гомологии* (у растений и животных) они существуют там и по сегодняшний день.

Если бы статья по ботанике была написана братьями Браве после знаменитых «Мемуаров» Огюста, то возможно, что разработанный им геометрический аппарат для описания закономерно организованных объектов-многогранников был бы использован и при описании законов ветвления. Однако этого не произошло. Будучи полностью поглощенным кристаллографией, Огюст Браве не успел вернуться к проблеме филло-

* В теории симметрии, или современной геометрии, этому термину придается совершенно иной смысл.

таксиса. Ботаники оценили достижение братьев, но развитие описательной морфологии пошло другим путем.

Вот как примерно в 1937—1938 гг. оценил вклад О. Браве выдающийся русский естествоиспытатель В. И. Вернадский: «Браве, биолог по своим научным интересам, обратившийся с этой точки зрения к изучению кристаллов, положил основание геометрическому учению о симметрии кристаллов и в то же самое время выяснил по существу иной характер симметрии организмов по сравнению с кристаллами. Но его работа, глубокого геометра и натуралиста, была прервана в самом разгаре неизлечимой болезнью. Нить, им упущенная, не нашла себе выразителя. Геометрически симметрия живых организмов находится в хаотическом состоянии. Собранные факты не охвачены геометрической мыслью. Дальше Браве, мне кажется, никто не пошел». *

Первой серьезной работой по симметрии в мире растений была публикация Г. В. Вульфа «Симметрия и ее проявление в природе» (1908 г., второе издание — 1919 г.), в которой Г. В. Вульф следовал классическому подходу к изучению проявлений симметрии в живой природе (как среди растений, так и животных). Эта публикация послужила примером для его учеников (например, академика А. В. Шубникова). Помимо этого, в ней развита интересная аналогия между симметрией цилиндрической поверхности и 17 группами симметрии паркетов (односторонних плоскостей), известных из пионерской работы Е. С. Федорова «Симметрия на плоскости» (1899 г.).

До 50-х годов приложение теории симметрии к описанию морфологии (точнее, архитектоники растений и животных) биообъектов шло классическим путем. Единственная в то время публикация академика Д. В. Наливкина «Криволинейная симметрия» (1925 г.), несмотря на весьма благоприятный отзыв крупнейшего в то время кристаллографа СССР А. К. Болдырева, прошла почти бесследно и привела к развитию описательной биосимметрии только в 70-х годах XX в.**

* Вернадский В. И. Размышления натуралиста. М., 1975, с. 60.

** Наливкин В. Д. Д. В. Наливкин: Жизнь и творчество. Л., 1986.

Очень интересны опубликованные в 1936 г. труды Д. Д. Мордухай-Болтовского по изучению зависимостей между механической прочностью радиолярий и их строением, в том числе с позиций их симметрии.

Логическим продолжением и развитием книги Г. В. Вульфа явилась знаменитая «Симметрия» А. В. Шубникова, имеющая подзаголовок «Законы симметрии и их применение в науке, технике и прикладном искусстве». В ней автор писал следующее: «Что касается организмов, то для них мы не имеем такой теории, которая могла бы ответить на вопрос, какие виды симметрии совместимы и какие не совместимы с существованием живого вещества. Но мы не можем не отметить здесь тот в высшей степени замечательный факт, что среди представителей живой природы, пожалуй, чаще всего встречаются как раз простейшие из невозможных для затвердевшего, окристаллизованного, «мертвого» вещества виды симметрии (пятерная симметрия).»* В связи с этим академик Н. В. Белов позднее выдвинул предположение, что «стремление» к пятерной симметрии (пентаэдрической, икосаэдрической) является способом защиты от захвата кристаллической решеткой, т. е. убежищем от кристаллизации — смертельной опасности для любого биологического объекта.

В начале 40-х годов вышла в свет великолепная монография В. Н. Беклемишева «Основы сравнительной анатомии беспозвоночных», весь первый том которой был посвящен систематике проявлений симметрии у простейших. Однако и в ней, несмотря на колоссальный объем собранного материала, используются только самые необходимые представления классической симметрии. Тем не менее автору удалось создать необычайно стройную концепцию возникновения симметрии (классической) в природе, используя принцип симметрии П. Кюри и глубокое знание эволюции простейших. То же самое можно сказать и о интереснейшей монографии Д'Арси Томпсона «Рост и форма» (1942 г.), в которой только намечены пути использования математических методов в морфологии организмов.

Первый шаг на пути создания адекватного проблеме математического аппарата сделал выдающийся немец-

* Шубников А. В. Симметрия. М.; Л., 1940, с. 54.

кий математик Г. Вейль. Первую половину своей жизни Вейль проработал в Геттингене и Цюрихе. С приходом к власти фашистов он эмигрировал в США, в Принстон, где спокойно трудился до 1951 г., затем вернулся в Цюрих. В теорию симметрии Г. Вейль внес выдающийся вклад. Будучи учеником Ф. Клейна и Д. Гильберта, он впитал в себя основные идеи Б. Римана, Г. Гельмгольца, самого Ф. Клейна, связанные с понятиями симметрии и осмысленные им на языке теории групп и теории инвариантов. Плодотворные контакты с А. Зоммерфельдом и А. Эйнштейном привели его к идее использования теории симметрии при описании физических явлений. С 1924 г. начинается блестящий период разработки теории представлений групп преобразований и их физических приложений. Достаточно назвать две его работы, составившие огромный вклад в использование идеи инвариантности в физике: «Теория групп и квантовая механика» (1928 г., Лейпциг), являющаяся образцом классического изложения проблемы, и «Классические группы, их инварианты и представления» (1939 г., Принстон) — также математическая классика. Его глубокая монография «Симметрия» вышла на английском языке в 1952 г. Преобразования подобия были введены им в описательный аппарат симметрии следующим образом: «Если рассматривать потенциально бесконечные узоры, подобные линейным орнаментам, или бесконечные группы, то окажется, что операция, относительно которой данный узор остается неизменным, не обязательно должна быть движением, она может быть и подобием».*

Квинтэссенцией его взгляда на соотношение между симметрией и ее проявлениями в природе служит следующее замечательное высказывание ученого: «...всякий раз, когда вам приходится иметь дело с некоторым объектом, наделенным структурой, попытайтесь определить группу его автоморфизма, т. е. группу, элементами которой являются преобразования, оставляющие без изменения все структурные соотношения. Вы можете рассчитывать на то, что на этом пути вам удастся глубоко проникнуть во внутреннее строение объекта».**

По этому пути пошло развитие многих разделов

* Вейль Г. Симметрия. М., 1968, с. 93.

** Там же, с. 160.

математики и, что очень важно, приложений теории групп к физике конденсированного состояния. Тем не менее честь создания нового раздела — «симметрии подобия» принадлежит А. В. Шубникову, который в статье с одноименным названием впервые обосновал выделение симметрии подобия в самостоятельный раздел теории симметрии и наметил основные пути ее приложений к описанию морфологии биообъектов.* В дальнейшем исчерпывающий вывод групп симметрии подобия, их классификация и обобщения были произведены с 1963 по 1970 г. в основном в трудах А. М. Заморзаева и Э. И. Галярского.**

Парадоксально, но появление удобного формального аппарата для описания архитектоники биообъектов не сказалось на продуктивности развития этого научного направления ни в ботанике, ни в биологии. По-видимому, на первый план в изучении растительного и животного царств выдвинулись другие области биологии (эволюционная генетика, биофизика и т. п.). Проблемы систематики и морфологии растений с позиций их симметрии временно потеряли свою актуальность. Из числа проблем, имеющих прямое отношение к симметрии и активно изучаемых биологами, можно назвать только «хиральность биосферы»***. Отметим здесь, что пока эта задача очень далека от удовлетворительного решения.

Возвращаясь к морфологическому подходу в биологии, следует сказать, что временный спад активности в этом направлении скоро сменится быстрым прогрессом и взлетом, поскольку в теории классической и обобщенной симметрии накоплен огромный потенциал, который ждет своего применения. В частности, развиты теории конформной и криволинейной симметрии, позволяющие более детально описывать формы и структуры природных объектов биогенного происхождения.

В последние годы выяснено, что теоретико-групповой аппарат описания форм и структур природных объектов образует формальную языковую систему и тем самым

* Алексей Васильевич Шубников (1887—1970). Л.; 1984.

** Заморзаев А. М., Галярский Э. И., Палистрант А. Ф. Цветная симметрия, ее обобщения и приложения. Кишинев, 1978.

*** Кизель В. А. Физические причины дисимметрии живых систем. М., 1985.

является языком симметрии.* Прослеживается много-
уровневая иерархическая система языков описания
форм и структур природных объектов.**

* *Дубов П. Л.* Язык симметрии. Л., 1986. Деп. ВИМИ, ДО №-6977.

** *Дубов П. Л.* Языки описания упорядоченных фигур. Л., 1988. Деп. ВИМИ, ДО № 7803; Языки описания неупорядоченных фигур. Л., 1989. Деп. ВИМИ, ДО №-7804; Языки описания форм и структур в биологии. Л., 1989. Деп. ВИМИ, ДО №-8064.

Основные даты жизни и деятельности О. Браве

1811 23 августа	— родился в г. Анноней.
1825	— завершил классическое образование в коллеже г. Анноней.
1825—1827	— обучался в коллеже св. Станислава.
1828—1829	— учился в лицее Людовика Великого.
1830 февраль	— поступил в Политехническую школу.
1830 28 июля	— участвовал в июльском восстании парижан.
1832	— окончил Политехническую школу и был направлен во флот.
1832 январь—1833 октябрь	— участвовал в съемке французских владений в Африке на бригах «Финистер» и «Луара».
1834 1 февраля	— получил чин лейтенанта флота.
1835	— вышла в свет первая научная работа (совместно с Камиллом Браве) по ботанике.
1837 12 августа	— участвовал в военной операции в Алжире.
1838 июнь—1840 январь	— участвовал в Северной научной экспедиции на корвете «Решерш».
1841 1 февраля	— возглавил кафедру прикладной математики и астрономии в Лионе.

- | | |
|------------------------|---|
| 1844 29 августа | — совершил восхождение на Монблан. |
| 1847 | — вступил в брак с Антуанеттой Мутье. |
| 1849 | — опубликовал «Исследование о многогранных симметричной формы». |
| 1850 | — вышел в свет «Мемуар о системах точек, правильно распределенных на плоскости или в пространстве». |
| 1852 | — избран председателем Метеорологического общества. |
| 1854 29 мая | — избран в Академию наук. |
| 1854—1856 | — работал над «Кристаллографическими этюдами». |
| 1863 30 марта | — скончался в Версале. |

Оглавление

Предисловие	5
Г л а в а 1.	
Эпоха. Семья. Детство	7
Г л а в а 2.	
Годы учения	16
Г л а в а 3.	
Путешествия	25
Г л а в а 4.	
Зрелость. Интерес к кристаллографии	43
Г л а в а 5.	
Последние годы	58
Г л а в а 6. Предшественники и современники Браве в науке о кристаллах	62
Г л а в а 7. О. Браве — кристаллограф	85
Г л а в а 8.	
Развитие идей Браве	103
Основные даты жизни и деятельности О. Браве	141

Илларион Илларионович Шафрановский
Петр Львович Дубов

ОГЮСТ БРАВЕ
1811—1863

*Утверждено к печати
Редколлегией серии
«Научно-биографическая литература»
Российской академии наук*

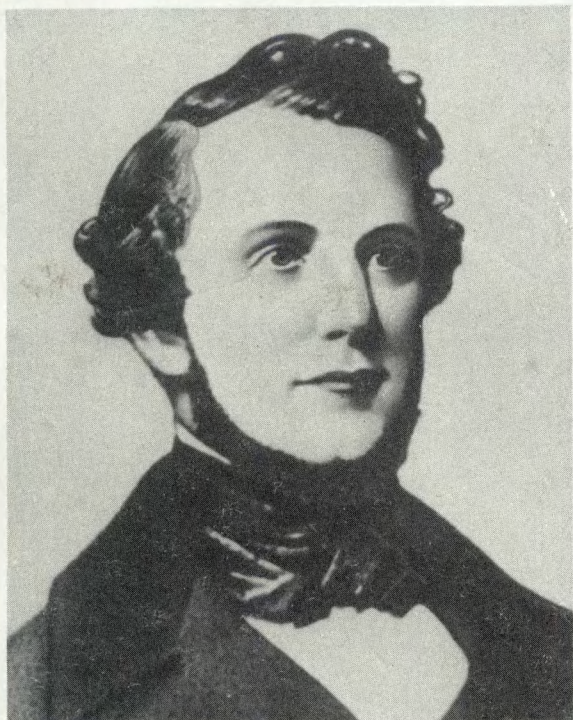
Технический редактор О. В. Иванова
Корректор У. В. Емельянова

Лицензия № 020297 от 23 июня 1997 г.
Сдано в набор 18.10.90. Подписано к печати 31.10.97. Формат
84 × 108 1/32. Бумага офсетная. Гарнитура литературная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7.6. Уч.-изд. л. 7.65.
Тираж 500. Тип. зак. № 450. С 214

Санкт-Петербургская издательская фирма РАН
199034, Санкт-Петербург, Менделеевская лин., 1

Санкт-Петербургская типография № 1 РАН
199034, Санкт-Петербург, 9 лин., 12

И.И. Шафрановский, П.Л. Дубов • **Огюст БРАВЕ**



*И.И. Шафрановский
П.Л. Дубов*

Огюст БРАВЕ



Санкт-Петербург
„НАУКА”
