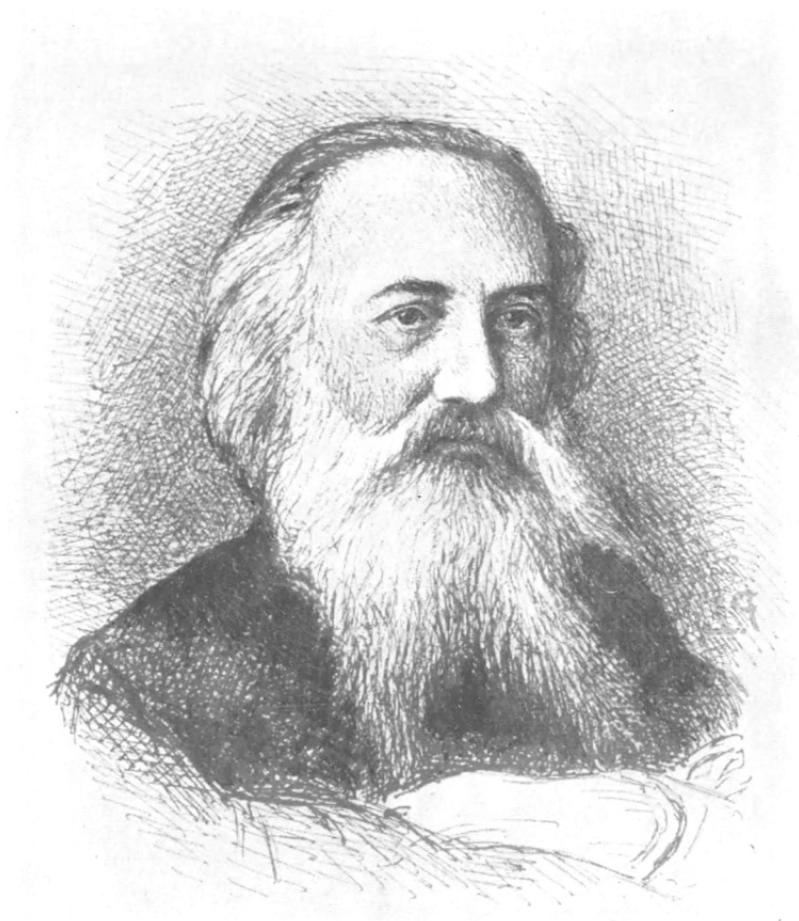


АКАДЕМИЯ НАУК СССР





Е. С. ФЕДОРОВ
Рисунок акад. П. П. Лазарева.

И. И. Шафрановский

ЕВГРАФ СТЕПАНОВИЧ
ФЕДОРОВ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА · ЛЕНИНГРАД

1 9 6 3

О т в е т с т в е н н ы й р е д а к т о р
чл.-корр. АН СССР Г. Б. Б О К И Й

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Рядом с излюбленными науками стоят захудалые, будто высохшие научные дисциплины — кристаллография и минералогия, никогда не вызывавшие живого интереса за пределами узкого круга специально занимающихся ими. Еще, пожалуй, в области минералогии несколько выделяются самоцветные камни, но и относительно этих объектов нашей науки можно сказать, что почти всегда ими предпочитают полюбоваться, чем про них читать или слушать. Самой же худенькой и невзрачной старушкой оказывается кристаллография. Любопытно бы знать процент лиц нашей интеллигенции, хотя бы слышавших что-нибудь про эту науку, даже о самом ее названии».¹ Приведенные слова были написаны в 1904 г. гениальным русским кристаллографом Евграфом Степановичем Федоровым, жизни и творчеству которого посвящается эта книга. С тех пор положение науки о кристаллах резко изменилось. Приборостроение, радиотехника, металлургия, производство химических продуктов, оптика, камнелитейное дело, сахарное производство и многие другие области промышленности и техники основываются сейчас на всемерном использовании кристаллических объектов. Все они кровно заинтересованы в дальнейшем развитии кристаллографии. Сверхточные приборы на космических кораблях, непревзойденные по твердости искусственные алмазы, «рубиновые карандаши» с их «игольчатыми лучами» — все эти сенсационные достижения науки сегодняшнего дня базируются на кристаллах. Недаром в нашей стране имеется специальный Институт кристаллографии при Академии наук.

¹ Е. С. Федоров. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, стр. 1—2.

Не случайно издается целая серия научных журналов, посвященных почти целиком кристаллографической тематике («Кристаллография», «Журнал структурной химии», «Физика твердого тела» и др.).

Интерес к кристаллам и кристаллографии растет с каждым днем, а вместе с ним возникает и желание широких кругов читателей ознакомиться с основоположниками науки о кристаллах.

Одним из величайших кристаллографов, пользующихся мировой славой, является замечательный русский ученый — Евграф Степанович Федоров (1853—1919). «Имя его должно стать для нашего времени рядом с именами Д. И. Менделеева и И. П. Павлова», — писал академик В. И. Вернадский. Теоретически выведенные Е. С. Федоровым двести тридцать геометрических законов, по которым должны располагаться атомы в кристаллах, лежат в основе всей современной кристаллографии. Этот вывод, осуществленный в 1890 г., за 22 года до первых расшифровок реальных структур с помощью рентгеновских лучей, представляет замечательный пример научного предвидения, достойный стоять в одном ряду с гениальным предсказанием Д. И. Менделеева еще не открытых химических элементов.

Теодолитный метод Федорова, основанный на сконструированных им приборах — столике для микроскопа и двукружном гониометре, — открыл новую эпоху в изучении кристаллов минералов и горных пород. Сейчас находит свое дальнейшее развитие и федоровский кристаллохимический анализ, позволяющий по внешней форме кристалла определять его вещество.

Колоссальное научное наследие ученого, составляющее 500 с лишним трудов по кристаллографии, геометрии, петрографии, минералогии, геологии и другим наукам оказало огромное влияние на развитие современных научных знаний.

Свои научные достижения Е. С. Федоров всегда стремился применить к практике. Его страстная натура никогда не могла замкнуться в одних узко научных рамках. Вся свою жизнь он был не только передовым ученым, но и гражданином и общественным деятелем.

Идеи и методы Федорова продолжают оставаться в современной науке жизненными и действенными. На наших глазах происходит их дальнейшее развитие и

углубление. Этим объясняется и растущая популярность имени Евграфа Степановича Федорова и неослабевающий интерес к его трудам и жизни, что в некоторой степени отразилось и на судьбе настоящей книги. Предлагаемое издание представляет собой в корне переработанную книгу «Е. С. Федоров», вышедшую в свет в 1951 г. С тех пор число трудов о нашем ученом возросло более чем в два раза. Благодаря розыскам библиографов значительно пополнились списки его печатных трудов (число их возросло от 417 до 521). На юбилейных торжествах, посвященных 100-летию со дня рождения Евграфа Степановича и 40-летию со дня его смерти, были заслушаны интересные воспоминания учеников и почитателей великого кристаллографа. Наконец, в Архиве Академии наук СССР удалось обнаружить замечательные автобиографические записки Е. С. Федорова под заглавием «Императорская Академия наук». Эти записки вместе с обширными, до сих пор не опубликованными воспоминаниями жены ученого — Людмилы Васильевны Федоровой — содержат наиболее ценные сведения о его жизни. Все эти новые материалы нашли широкое отражение в настоящей книге. Используются здесь и богатейшие собрания Архива Академии наук СССР и Ленинградского горного института, где хранятся документы о жизни и творчестве Евграфа Степановича.

С благодарностью учтены также поправки, указания и дополнения, высказанные критиками и читателями моей старой книги о Е. С. Федорове.

ДЕТСТВО И ЮНОСТЬ

Перед нами сумрачная столовая в старинной петербургской квартире. За окнами морозная темень. Большой стол тускло освещается керосиновой лампой под абажуром. Вокруг стола сидят три мальчика, всецело погруженные в свое дело. Старший брат, зажав ладонями уши, упорно заучивает наизусть какое-то правило латинской грамматики. Младший усердно разглаживает на бумаге переводные картинки. Но чем же занят их средний брат, напоминающий в своем коричневом халатике стриженую девочку с задумчивыми темными глазами? Как это ни странно, но мальчик вышивает огромную скатерть, предназначенную для обеденного стола. Пытливо вглядывается он в замысловатый узор, возникающий из-под его иглы. Его занимает строгая геометрия рисунка: вот этот цветок повторяется четырежды по углам квадрата, восемь раз появляются по сторонам маленькие звездочки, а в самом центре красуется большое круглое солнце, от которого исходят лучи ко всем окружающим цветам и звездочкам.

От матери, засадившей его за вышивку, маленький Граня знает, что создаваемый им узор должен быть симметричным. Вглядываясь в него, он улавливает закономерную повторяемость деталей вышивки. Кто знает, быть может фантастическая затея матери, поручившей малышу работу со скатертью, дала первый толчок к ясному пониманию сложнейших законов симметрии, обесмертивших впоследствии его имя?

Этот эпизод из раннего детства нередко любил вспоминать сам ученый. Полушутя он утверждал, что своей огромной трудоспособностью и усидчивостью, а вместе с тем и любовью к симметрии он прежде всего обязан ма-



Степан Иванович Федоров, отец ученого.

тери, приучавшей его вышивать узоры на скатертях и коврах.

Остановимся, однако, на самом начале жизни великого кристаллографа.

Евграф Степанович Федоров родился в Оренбурге 10 декабря 1853 г. Вскоре после рождения мальчика семья переселилась в Петербург. Резкая перемена климата не могла не отразиться на здоровье ребенка, часто и подолгу хворавшего. Отец его, Степан Иванович, генерал-майор инженерных войск, мало уделял внимания своему сыну и не оказывал на него большого влияния.

В архиве ученого сохранилась полувыцветшая пожелтевшая фотография — портрет Степана Ивановича, на обороте которой рукой Е. С. Федорова написана краткая характеристика отца: «Родился в крестьянской семье, откуда и вынес некоторую грубость манер, неприятно действовавшую на людей высшего света. Отличительные черты — неустойчивость и доброта. Не сделал ничего великого и умер мирным генералом в 1866 г. 15 июня в г. Баку в командировке».

Типичный представитель военного сословия того времени, легкомысленный и вспыльчивый, Степан Иванович меньше всего заботился о воспитании и здоровье своих детей. Сохранился рассказ о том, как маленький Граня, страдавший английской болезнью и часто падавший на прогулках, награждался выведенным из терпения отцом пинками. Однако мальчик при этом никогда не плакал, а справедливо замечал: «Мне не больно, а тебе стыдно».

Совершенно иное влияние оказывала на своих сыновей мать Евграфа Степановича. Дочь виленского прокурора, урожденная Ботвинко, Юлия Герасимовна безусловно являлась в свое время передовой женщиной. Под ее руководством будущий ученый с малых лет пристрастился к чтению. Она же заложила основы его музыкального образования, обучив игре на рояле и пению. В детстве научился он играть также и на скрипке. Горячо любя своих детей, Юлия Герасимовна вместе с тем с ранних лет приучала их к труду и дисциплине.

Математические способности будущего ученого проявились чрезвычайно рано. Сам Е. С. Федоров пишет об этом в своих «Автобиографических записках» следующее:



Юлия Герасимовна Федорова, мать ученого.

«К пяти годам мною были усвоены не только первоначальная грамотность, но и начала арифметики в виде четырех действий. . .

В 1863 г. мне как-то попала на глаза элементарная геометрия Шульгина — небольшой учебник, написанный для кадетских корпусов. . . Я шутя начал читать первые страницы этого учебника, но содержание этих страниц с самого начала вызвало такое созвучие струн моей психики, что я был буквально увлечен этим чтением; каждое слово, каждая фраза учебника с такою силою отпечатались в моем уме, что непрерывно и без всякой остановки, так сказать, запоем, прочтя эту книжонку, я на всю жизнь усвоил все, что там было написано.

Замечу мимоходом, что в других отношениях у меня всегда была очень слабая память, и я должен был употреблять упорные усилия, чтобы что-нибудь выучить наизусть, а особенно собственные имена, числа и тому подобные частности, не связанные логичным сочетанием с предметом изложения».¹

Десяти лет мальчик поступил во второй класс Анненского реформатского училища, славившегося среди петербуржцев.

В 1866 г. скончался отец ученого. Осиротевшая семья — мать, три малолетних сына и дочь — осталась с весьма скудными средствами. Продолжать занятия в училище, стоившие чрезвычайно дорого, оказалось невозможным, и в 1867 г., после усиленных хлопот, трех братьев Федоровых удалось определить на казенный счет во вторую военную гимназию.

Бездушное отношение тупых воспитателей, злые издевательства старших учеников над младшими, мертвящие душу казенщина и муштровка, — все эти нравы, царившие в военных училищах того времени, не могли не произвести тяжелого впечатления на даровитого мальчика.

Однако попав в суровую обстановку военной гимназии, он не примирился с ней и не сдался, а примкнул к небольшой группе товарищей, стремившихся всемерно расширить свой умственный кругозор. Члены этой группы усиленно читали все, что удавалось достать, и нередко ста-

¹ Е. С. Федоров. И[мператорская] П[етербургская] Академия наук. Автобиографические записки, воспоминания и характеристики. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 1, № 22. В дальнейшем: Е. С. Федоров. Автобиографические записки.



Е. С. Федоров — ученик военной гимназии (1867 г.).

вили втупик преподавателя математики требованием все более и более трудных задач по геометрии и алгебре.

«Постепенно мы перешли к анатомии, философии, естествознанию и наконец к социальным наукам»,² — вспоминал впоследствии сам Евграф Степанович. Вскоре выяснилось, что его знания далеко превосходят те, которые требуются программой. В связи с этим в 1869 г., не дожидаясь окончания гимназии, хотя ему оставался только один год, он блестяще выдержал конкурсный экзамен в Николаевское военно-инженерное училище. Интересно отметить, что к этому же году Е. С. Федоров относит и зарождение замысла своей первой большой геометрической работы, оформившейся впоследствии в известную книгу — «Начала учения о фигурах».

Выбор учебного заведения, очевидно, был связан с военными традициями семьи Федоровых. Начальство протестовало против приема в училище юноши, не закончившего гимназического курса и к тому же не достигшего требуемого по уставу шестнадцатилетнего возраста. Однако обширные познания Федорова настолько поразили экзаменаторов, что для него все же решили сделать исключение.

В Военно-инженерном училище будущий кристаллограф особенно увлекался математическими дисциплинами. В то же время он стал деятельным участником одного из нелегальных кружков самообразования. Жизненные воззрения членов кружка складывались преимущественно под влиянием сочинений Д. И. Писарева. Нельзя не привести отрывка из автобиографии ученого, ярко рисующего пробуждение его общественного самосознания.

«Как-то раз вечером, когда абсолютно нечего было делать, я прилег на своей кровати, а по соседству группа юнкеров слушала чтение статьи Писарева об университетском образовании. Я весь ушел в слух. До тех пор мне и в голову не приходили вопросы об обязанностях по отношению к Родине. Здесь же слова популярного писателя как молотом вбивали в сознание чудные идеи об обязанностях к отчеству, изнывающему в темноте, невежестве и бедности. Было ясно, что если не явится контингент людей, напрягших все силы своего ума, чтобы прийти на помощь народу в деле его просвещения, то

² Там же.



Е. С. Федоров — подпоручик саперного батальона
(1873 г.).

наша великая Родина навсегда останется последней в семье культурных народов, а темная масса народа будет продолжать влачить полунищенское существование и находиться под гнетом одичавшей администрации, держащей себя в положении завоевателей.

Первым последствием произведенного впечатления было то, что я в самое короткое время перечитал от доски до доски все тома сочинений Писарева, а зародыши гражданского чувства поднялись до такой высоты, что я как бы дал себе честное слово отдать все свое время самому полному и разностороннему знанию, не сомневаясь, что плоды такого решения, во всяком случае, окажутся для отечества самыми ценными из того, на что я способен по своей природе.³

Жадно усваивались членами кружка широко распространенные среди передовой молодежи того времени смелые взгляды материалистов-естественников; недаром любимым их героем считался тургеневский Базаров. Еще в гимназии одной из первых книг, привлечших внимание Федорова, была отличающаяся своим ярко выраженным материалистическим характером известная «Физиология обыденной жизни» Д. Г. Льюиса (она же дала толчок к увлечению естественными науками и молодому И. П. Павлову). «Одна из первых книг, которая казалась нам особенно важной для самообразования»,⁴ — писал о ней сам Федоров. В воспоминаниях выдающейся женщины-математика С. В. Ковалевской в иронической форме подтверждается огромная популярность «Физиологии обыденной жизни»: «Стоит у нас барышне прочесть эту книгу или даже попросту украсить ею свой письменный стол, чтобы тотчас же прослыть современной и развитой».⁵

Образцом для Евграфа Степановича в инженерном училище был один из его товарищей — Вноровский, читавший даже в промежутках между лекциями книги по высшей математике и астрономии. «Мы смотрели на него, как на нечто высшее»,⁶ — вспоминал о нем Евграф Степанович. Следуя его примеру, и Федоров старался каждую свободную минуту употребить для самообразо-

³ Там же.

⁴ Там же.

⁵ С. В. Ковалевская. Воспоминания и письма. Изд. АН СССР, 1951, стр. 154.

⁶ Е. С. Федоров. Автобиографические записки.

вания, а затем и для научной работы. Этому правилу он остался верен до самой смерти.

Судя по автобиографическим заметкам ученого, в этот период в нем начинает нарастать резко оппозиционное настроение по отношению к властям. Горячий протест вызвало распоряжение, категорически воспредавшее учащимся иметь в отведенных им шкафчиках какие-либо книги, кроме учебников. Тайные обыски, суровые репрессии глубоко возмущали молодежь. Особенно взволновало всех исключение из училища нескольких юнкеров, у которых в личных шкафчиках была обнаружена запретная литература. Среди исключенных был и товарищ Федорова — Вноровский.

В 1872 г. Е. С. Федоров закончил курс Военно-инженерного училища и в чине подпоручика саперного батальона уехал служить на Украину, в Белую Церковь.

Однако военная среда того времени не могла удовлетворить юношу, стремившегося всеми силами к дальнейшему развитию своих знаний. Поэтому уже в мае следующего года он возвратился в Петербург, а в 1874 г. вовсе уволился с военной службы.

РЕВОЛЮЦИОНЕР-ПОДПОЛЬЩИК И НАЧИНАЮЩИЙ УЧЕНЫЙ

«Хотя книги математического содержания были в моем представлении облечены ореолом особой красоты и вызвали к самостоятельным выводам, но преимущественное внимание я уделял сочинениям медицинского характера. В принципе я решил посвятить себя медицине, а именно чисто научной медицине, все яснее и яснее сознавая, как слабо в так называемой медицине поставлена именно научная часть, и тогда казалось ясным, что математика также должна быть привлечена на помощь медицине, как она служит основой и для точных наук».¹ Такими характерными словами Евграф Степанович описывает свое юношеское увлечение медициной. В результате этого увлечения, столь характерного для передовой молодежи того времени, он стал вольнослушателем Военной медико-хирургической академии.

К этому периоду относится знакомство Федорова с его будущей женой — Людмилой Васильевной Панютиной, живой, целеустремленной девушкой, приехавшей из Кунгура учиться на Петербургских медицинских курсах.

В обширных воспоминаниях Людмилы Васильевны сохранилось немало строк, посвященных молодому Федорову. Из них мы узнаем, что еще задолго до личного знакомства автору воспоминаний приходилось слышать от своего брата, студента Военно-медицинской академии, восторженные отзывы о необыкновенном уме и способностях Евграфа Степановича.

¹ К. С. Федоров. И[мператорская] П[етербургская] Академия наук. Автобиографические записки, воспоминания и характеристики. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 1, № 22.

Первая встреча состоялась на квартире у Людмилы Васильевны. Поводом к ней послужила смерть старого черного кота, которого молодежь решила вскрывать по всем правилам науки. На эту торжественную церемонию был приглашен и Евграф Степанович.

«К назначенному часу, минута в минуту, раздался звонок, — вспоминает Людмила Васильевна, — пришел не офицер, а офицерик с большим выпуклым лбом и каким-то одухотворенным лицом. Такими рисуют фанатики. Поздоровался он, как-то не глядя в лицо, отцепил свою саблю и поставил в угол».²

Дальнейшее знакомство поддерживалось встречами на собраниях студенческих кружков. Здесь Федоров давно уже обратил на себя всеобщее внимание. На этих собраниях Евграф Степанович подробно излагал своим товарищам учение Карла Маркса. Изучая философию и самостоятельно работая над некоторыми философскими проблемами, он охотно выступал с критическим разбором взглядов Канта, Спенсера, Конта и других философов, однако от дискуссий по спорным вопросам общего характера обычно воздерживался, говоря: «Зачем навязывать свои измышления, если их нельзя доказать математическим или экспериментальным путем?».³ Эта мысль молодого Федорова нашла свое выражение в его более поздних высказываниях, являющихся как бы лейтмотивом всего творчества ученого: «Венец сознательной деятельности человеческого разума — решение стоящих перед ним вопросов путем математического анализа».

По-видимому в этот же период Евграф Степанович написал свою большую философскую работу «Перфекционизм», отличающуюся ярко выраженным материалистическим характером. Попытка напечатать эту обширную работу закончилась неудачей. Публикуя ее в 1906 г., Федоров писал: «Впервые статья под тем же заглавием была в середине 70-х годов предъявляема в редакции „Знания“ и „Отечественных записок“ и не была помещена по разным мотивам. Покойный Салтыков-Щедрин, выра-

² Л. В. Федорова. Наши будни, горести и радости. Воспоминания. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 2, № 47. В дальнейшем: Л. В. Федорова. Воспоминания.

³ Там же.

жая принципиальное сочувствие, находил ее непоместимой по цензурным соображениям».⁴

Обсуждение серьезных проблем на студенческих собраниях нередко чередовалось с музыкальными номерами. Евграф Степанович мастерски играл на рояле и скрипке, а иногда выступал и в качестве певца.

В то же время он с увлечением продолжал штудировать медицину. По свидетельству Людмилы Васильевны, в квартире Федоровых обычно стоял запах супа, так как неизменно производилось кипячение костей для изучения их внутреннего строения.

Вскоре, однако, молодому ученому был нанесен жестокий удар. Граф Д. Толстой, тогдашний министр просвещения, издал циркуляр, согласно которому при поступлении в Военно-медицинскую академию требовалось представление аттестата зрелости. Тем самым Федоров, как не окончивший классической гимназии, лишился права быть студентом академии. Готовиться к сдаче экзаменов за полный гимназический курс не представляло никакого интереса, так как главное внимание экзаменаторов обращалось на знание латинского языка. Тратить же дорогое время на зубрежку нелюбимой мертвой латыни Евграфу Степановичу казалось просто бессмыслицей. Усиленные хлопоты его об оставлении в числе студентов академии окончились полной неудачей. В результате Федоров покинул Военно-медицинскую академию и немедленно, сдав соответствующие экзамены, поступил на второй курс Технологического института, где основное внимание уделял изучению химии, физики и, в частности, электричества. Выполнив до конца лабораторные работы, он оставил институт.

К этому времени уже вполне сложились основные черты научного мировоззрения молодого ученого. Все свои помыслы и интересы он направил в сторону глубочайших теоретических проблем. Ценным свидетельством его научных занятий является следующий отрывок из «Автобиографических записок»: «В этот период меня особенно интересовала физика и прежде всего учение об электричестве. Мною была составлена довольно большая рукопись по теории электричества, которую я, однако,

⁴ Е. С. Федоров. Перфекционизм. Изв. С.-Петербур. биол. лаборат., 1906, т. VIII, вып. 1, стр. 25.

не считал возможным представить к опубликованию, пока не удалось бы решительными опытами сделать очевидной правильность составленной теории.

Но судьба мне решительно не благоприятствовала; не представлялось случая воспользоваться оборудованием физического кабинета, и мало-помалу физика мной забывалась. И только в начале нового, текущего столетия, ознакомившись с новейшими течениями физики, я увидел, что составленная мной за четверть столетия теория есть, в сущности, теория электронов». ⁵

Наряду с физикой молодого ученого увлекала химия. Интерес к этой науке отнюдь не был случайным. Еще до поступления в Технологический институт Федоров усиленно штудировал «Основы химии» Д. И. Менделеева. ⁶ Увлечение химией красной нитью проходит через все его научное творчество. В списке научных трудов Евграфа Степановича на первом месте стоит «Попытка подвести атомные веса под один закон», опубликованная в журнале Русского физико-химического общества за 1881 г. Синтез геометрической и химической кристаллографии явился впоследствии фундаментом для создания в последние годы жизни ученого его кристаллохимического анализа, позволяющего по внешней форме кристаллов определять их вещество.

О том, как глубоко вникал молодой Федоров в самую сущность интересовавших его научных проблем, свидетельствует недавно сделанное любопытное открытие, связанное с его первой опубликованной заметкой «Попытка подвести атомные веса под один закон». Чрезмерная краткость изложения и грубые математические опечатки не позволяли до сих пор понять и оценить сущность этой работы.

Однако несколько лет тому назад Н. З. Андреев, С. А. Щукарев и Р. Б. Добротин обнаружили в личной библиотеке Д. И. Менделеева рукопись упомянутой статьи Федорова. Плотные пожелтевшие листы ее вплетены вместе со статьями других авторов в специальный том, на корешке которого стоит дата — 1880 г. В библиотечном каталоге, составленном самим Менделеевым, руко-

⁵ Е. С. Федоров. Автобиографические записки.

⁶ «Ввиду плохой памяти „Основы“ Менделеева были прочитаны и просмотрены шесть раз», — отмечается в его автобиографии.

пись называется: «Федоров. Атомные веса». Несомненно, что Менделеев эту работу читал и думал над ней, так как на полях одного из листов рукописи сохранилась пометка, сделанная рукой гениального химика. К сожалению, никаких дополнительных сведений о взаимоотношениях двух великих ученых до сих пор не обнаружено.

Проф. С. А. Щукарев, давая характеристику этой ранней федоровской работы, писал, что в ней «есть моменты, которые, будучи восприняты с точки зрения современной химии и физики, являются не только предсказаниями более поздних открытий, но, может быть, содержат некоторые мысли, представляющие интерес даже для будущего».⁷

В своей работе Евграф Степанович стремился найти математическую связь между атомными весами — пытался проникнуть в самую сущность периодического закона Менделеева. Он считал, что атомы состоят из одинаковых, плотнейшим образом упакованных весомых единиц, сплошь заполняющих их объемы. Зная вес атома, можно вычислить его объем и число, пропорциональное его поверхности.

С современной точки зрения эти высказывания следует отнести не ко всему атому, а лишь к его ядру, так как все весомые единицы находятся именно в ядре. Вычислив для различных элементов числа, пропорциональные поверхностям их атомов (ядер), Федоров обнаружил, что «элементы располагаются в естественной системе в арифметической прогрессии величин поверхностей их атомов».⁸

Очень интересна мысль молодого ученого, согласно которой сами атомные веса, положенные Менделеевым в основу его периодического закона, являются функцией чего-то еще более простого. И это не все. С. А. Щукарев и Р. Б. Добротин заканчивают разбор юношеской работы Федорова следующими многозначительными словами: «С помощью простых геометрических соображений великий русский кристаллограф нащупал одно из основных

⁷ С. А. Щукарев и Р. Б. Добротин. Об одной рукописи Е. С. Федорова по периодическому закону. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Лен. горн. инст., 1955, стр. 84.

⁸ Е. С. Федоров. Попытка подвести атомные веса под один закон. Там же, стр. 93.

представлений современной физики атома — понятие о порядковом номере, соответствующем заряду ядра».⁹

По выходе из института Евграф Степанович усиленно посещал читальные залы Публичной библиотеки, жадно поглощал литературу по математике и физике.

Вместе с тем он не отрывался от жизни, не замыкался в узких рамках чистой науки. Его страстная, протестующая против насилия и несправедливости натура не могла оставаться в стороне от революционной борьбы. Народнические взгляды, господствовавшие тогда среди некоторой части революционно настроенной интеллигенции, увлекли и его. Уже в бытность студентом Технологического института, в 1876 г., Евграф Степанович входил в одну из крупнейших революционных организаций «Земля и воля» и принимал активное участие в подпольной работе. Однако поглощенный своими научными идеями, невероятно рассеянный и непрактичный, Федоров был мало пригоден для таких дел. Иллюстрацией этого может служить дошедший до нас рассказ о том, как Евграф Степанович отправился покупать военную форму для товарища, бежавшего из тюрьмы. На вопрос приказчика — какая именно форма нужна — Федоров ответил: «Все равно, дайте какую-нибудь».

Само собой разумеется, что такой ответ только чудом не навлек подозрений и не оказался причиной печальных последствий. Однако несмотря на это Федорову продолжали поручать разные важные задания. По рассказам его близких, именно ему принадлежала большая роль в освобождении из тюрьмы П. А. Кропоткина. Стоя у окна дома, выходящего на тюремный двор, он игрой на скрипке подавал условные сигналы к побегу.

В 1877 г. Евграф Степанович получил задание — наладить связь с заграничными революционными организациями. С этой целью он объехал Францию, Бельгию и Германию, зарабатывая средства на жизнь тяжелым физическим трудом. Несмотря на свое слабое здоровье, он работал носильщиком на железной дороге и даже молотобойцем в кузнице.

В Германии Евграф Степанович познакомился с В. Либкнехтом и А. Бебелем и под их влиянием про-

⁹ С. А. Щукарев и Р. Б. Добротин. Об одной рукописи Е. С. Федорова. Там же, стр. 84.

никся социал-демократическими идеями. Уже в это время ему стала ясна вся несостоятельность народнических идеалов. Сохранились сведения о его работе в качестве наборщика социал-демократической газеты.

Осенью 1877 г. Федоров возвратился на родину. Впоследствии жена ученого описала в своих воспоминаниях наружность Евграфа Степановича по приезде из-за границы: «В обносившемся куцем сером пиджачишке, с воспаленными веками и глазами, пострадавшими при работе в кузнице»,¹⁰ — таким предстал он перед ней после своих скитаний.

Возвратившись в Петербург, Федоров женился на Людмиле Васильевне, самоотверженно помогавшей ему в его научной и революционной деятельности. В их квартире была организована подпольная типография, где печаталась нелегальная газета «Начало». Эта типография существовала с 1878 по 1879 г. Помещалась она на верхнем этаже дома, стоявшего во дворе и выходившего окнами на угол, где, между прочим, был пост городского. Тот, кто выносил напечатанный материал или приносил чистую бумагу, обвязывал пакеты вокруг тела, надевал широкую нарядную шубу и имел вид толстого барина, не вызывавшего никаких подозрений у городского.

В типографии, помимо самого Евграфа Степановича, работали два человека. Один из них, Н. К. Бух, опубликовал в советское время интересные воспоминания об этом периоде. Рассказал он и о подпольной деятельности Е. С. Федорова, который носил партийную кличку «итальянец». Второй работник, по прозвищу «птаха», жил безвыходно в комнате типографии. Впоследствии, при ее разгроме, он застрелился.

Евграф Степанович был активным сотрудником и редактором иностранного отдела газеты. В частности, ему принадлежат напечатанные в «Начале» статьи «Хроника социал-демократического движения на Западе» и «Второй французский рабочий конгресс». В этот период он поддерживал близкие отношения с группой революционеров, подготовлявших убийство Александра II (Н. И. Кибальчич, В. Н. Фигнер и др.). С В. Н. Фигнер и Н. А. Моро-

¹⁰ Л. В. Федорова. Воспоминания,

зовым он состоял в самых дружеских отношениях до конца своей жизни.¹¹

Вопреки взглядам народников, в газете «Начало» указывалось, что только революционное выступление народных масс может привести к победе в борьбе против царского самодержавия. В газете были даны подробные материалы о забастовке рабочих на Новой бумагопрядильной фабрике в Петербурге, в которой приняло участие около 2000 рабочих.

Статья Евграфа Степановича «Хроника социал-демократического движения на Западе» свидетельствует о том, что Федоров не мог мириться с теорией народников, считавших основным революционным классом крестьянство, а не пролетариат. Он осуждал также тактику индивидуального террора, к которому все больше и больше склонялись народники.

Номера газеты «Начало» посылались Ф. Энгельсу. Из переписки Энгельса с Лопатыным и Лавровым видно, что Энгельс был знаком с этой газетой.

подавляющее большинство народников не было согласно с ее революционно-демократическим направлением. Народники неоднократно ставили вопрос о передаче им этого печатного органа, и с осени 1879 г. вместо газеты «Начало» стал выходить журнал «Земля и Воля».

Федоров, не разделяя взглядов народников, вышел из состава редакции, хотя, по воспоминаниям Н. К. Буха, этот уход он переживал очень тяжело.

Под влиянием социал-демократических идей Евграф Степанович сумел разглядеть ошибочность теории народ-

¹¹ В книге Н. А. Морозова «Звездные песни» мы находим следующее стихотворение, посвященное Е. С. Федорову.

К р и с т а л л ы

Е. С. Федорову.

В недрах стеклянных фиалов,
Словно волшебный скульптор,
Светлые грани кристаллов
Лепит бесцветный раствор.
В нас из сплетений неясных
Мыслей, мечтаний и дум
Грезы творений прекрасных
Вечно ваяет наш ум.
Родствен семье минералов
Мир бестелесных идей,
Грезы, как грани кристаллов,
Вкраплены в душах людей.

2 янв. 1919 г.

ников. Сказалось, конечно, и то, что будущий ученый старательно штудировал сочинения Карла Маркса, выступая с докладами о них в студенческих кружках.

Разгром народовольческой организации после убийства Александра II не коснулся Федоровых лишь случайно. Провокатор Дегаев, предавший многих революционных деятелей, знал Евграфа Степановича, но никаких уличающих показаний дать о нем жандармам не смог.

Между прочим, в записках Людмилы Васильевны приводится характерная деталь, свидетельствующая о настроении Евграфа Степановича в тот период. Именно в это время он начал усердно обучаться переплетному мастерству. На замечания близких о ненужности подобных занятий ответ его обычно был таков: «Знание какого-либо ремесла никогда не помешает. Оно может выручить, если очутишься не там, где желаешь жить».¹² Отметим кстати, что в сохранившейся личной библиотеке Е. С. Федорова многие книги, находящиеся в настоящее время на кафедре кристаллографии Ленинградского горного института, в том числе сборники его брошюр и оттисков, были переплетены самим ученым.

Несмотря на переживания, Евграф Степанович с увлечением отдался научной деятельности. Усиленные занятия геометрией привели его к открытию области, сравнительно мало затронутой математиками. Эта область касается пространственных фигур и должна рассматриваться как существенное дополнение к элементарной геометрии. Разработка теории математических многогранников натолкнула Федорова на вопросы, относящиеся к природным многогранникам, т. е. кристаллам. Таким образом, Евграф Степанович подошел к той теме, которая заняла главное место в его творчестве, — к кристаллографии. С огромным увлечением занялся он обработкой своего первого труда, посвященного учению о фигурах.

Об этом периоде научной деятельности Людмила Васильевна рассказывает в своих воспоминаниях: «Время усиленной работы мужа над учением о фигурах, которой он был всецело поглощен, совпало с появлением на свет нашего сына. В ночь после родов Евграф остался вдвоем со мной. Сначала он сидел возле меня и давал мне поне-

¹² Л. В. Федорова. Воспоминания.

много пить. Увидав, однако, что я все меньше и меньше пью и начинаю дремать, он на цыпочках ушел за ширму к своему письменному столу. От времени до времени я просыпалась и просила пить, на что Евграф мне отвечал: „Сейчас, сейчас, только минуточку обожди“. Сам же оторваться не может от стола. Мысли его бегут, нужно их записать. . . Вот при каких условиях ему, бедному, пришлось писать о своих фигурах, первую работу по специальности». ¹³

Следует заметить, что и в материальном отношении семья ученого была в это время обеспечена крайне плохо. Нередко приходилось обращаться за помощью к старшему брату, Евгению Степановичу, крупному военному инженеру и профессору, видному деятелю Русского технического общества по отделу воздухоплавания. Скудные средства добывались, главным образом, переводами журнальных статей и составлением газетных заметок. Одно время денежный вопрос стоял так остро, что ученый даже решил ограничить свой стол хлебом и селедкой.

Однако и стесненные обстоятельства не могли оторвать Евграфа Степановича от заинтересовавших его вопросов. Все более и более увлекаясь наукой о кристаллах, он решился, наконец, избрать себе специальность, ближе всего соприкасающуюся с кристаллографией, и в 1880 г., в возрасте 27 лет, поступил на третий курс Горного института. В стенах этого знаменитого учебного заведения он думал найти ответы на интересующие его научные вопросы; от профессоров института ждал он помощи в своих начинаниях; здесь, по его мнению, по достоинству мог быть оценен его первый труд — «Начала учения о фигурах».



¹³ Там же.

ИЗ ИСТОРИИ КРИСТАЛЛОГРАФИИ

Дальнейшее повествование о научных открытиях и достижениях Е. С. Федорова не будет понятным, если мы не познакомимся в самых кратких чертах с заинтересовавшей его наукой — кристаллографией. Поэтому, прежде чем рассказывать о последующих событиях жизни великого ученого, придется сделать небольшое отступление в область этой науки.

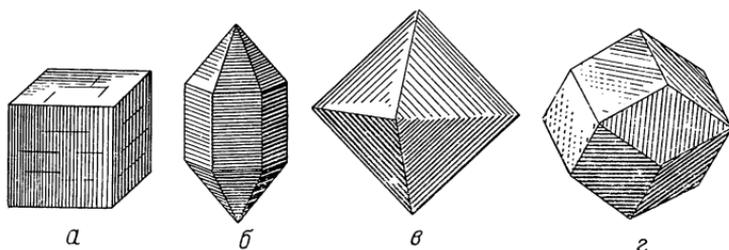


Рис. 1. Кристаллы каменной соли (*a*), кварца (*b*), магнетита (*v*) и граната (*z*).

Кристаллами обычно называются твердые тела, образующиеся в природе или растущие в лабораториях в виде многогранников с плоскими гранями (рис. 1). Геометрически правильная форма таких образований обуславливается прежде всего их внутренними свойствами.

Долгое время хорошо образованные и достаточно крупные кристаллические многогранники находили лишь в природе. Таковы, например, прекрасные кристаллы природного кварца, иногда достигающие человеческого роста. В лабораторных условиях получать кристаллы научились значительно позднее.

Само собой разумеется, что хорошо ограниченные большие кристаллические многогранники являются редкостью. Вот почему до сих пор распространено неверное мнение о редкости кристаллов вообще.

Однако внимательное изучение окружающих предметов легко убедит нас в повсеместном распространении кристаллических образований. Так, например, поваренная соль, сахарный песок, многие лекарства состоят из маленьких кристалликов. Воспользовавшись увеличительными стеклами микроскопа, мы увидим, что известное нам количество кристаллических тел резко увеличится. Оказывается, что кусок любого металла представляет скопление кристаллических зерен. То же самое можно сказать и о подавляющем большинстве горных пород, из которых слагается земная кора. Зерна полевого шпата, кварца и слюды, составляющие самую распространенную горную породу — гранит, возникли при застывании в земле огненно-жидкого расплава — магмы. Оптическим исследованием доказывалось, что каждое такое зерно является кристаллом. Рассматривая отдельные зерна, мы в большинстве случаев наблюдаем не прямолинейные очертания, характерные для кристаллов, а криволинейные и неправильные контуры. Последнее объясняется одновременным ростом в магме множества кристалликов, которые теснили друг друга и не могли образовывать правильных многогранников.

Оптически также доказывалось, что песок и глина состоят главным образом из мельчайших кристаллических обломков. Кристаллическими же являются такие горные породы, как известняки, доломиты, каменная соль, гипс. С 1912 г. посредством рентгеновских лучей ученым удалось как бы заглянуть внутрь строения кристаллов, удалось нащупать расположение в твердых телах мельчайших элементарных частиц, строящих материю, — атомов. С помощью рентгеноанализа круг известных нам кристаллических веществ еще более расширился. Например, доказана принадлежность сажи, воска, роговицы глаза к скоплениям мельчайших кристалликов, не поддающихся рассмотрению даже под микроскопом. Сказанного вполне достаточно, чтобы убедиться в огромном, повсеместном распространении кристаллов. Они встречаются буквально на каждом шагу — и в природе, и в технике, и в домашнем обиходе. Поэтому не будет преувеличенным утвержде-

ние об огромной роли кристаллов в народном хозяйстве. Достаточно упомянуть, что качество металлов и каменных строительных материалов, их твердость, прочность и другие свойства определяются величиной и расположением кристалликов, входящих в их состав.

Особенно возросло широкое применение кристаллов — как природных, так и полученных в лабораториях или на заводах — после первой мировой войны. Кристаллы используются в радиотехнике, приборостроении, оптической промышленности, металлургии, при производстве химических продуктов, в камнелитейном деле, сахарном производстве и т. д.

С каждым днем ученые открывают все новые и новые возможности практического использования кристаллов. Применение кристаллических веществ в народном хозяйстве страны возрастает с каждым днем, растет вместе с тем и значение кристаллографии.

Из сказанного видно, что привычные нам понятия о кристаллах не являются исчерпывающими. В самом деле, отдельные зерна гранита, металлических сплавов или многих химических осадков, будучи кристаллическими, в силу условий образования не обладают геометрически правильной внешней формой. Возникает вопрос относительно характерных особенностей, присущих всем кристаллам без исключения. Ответ на это был найден путем исследования веществ рентгеновскими лучами. Рентгеноанализ дал возможность установить пространственное расположение атомов, слагающих кристаллические тела. В результате было доказано, что решительно все кристаллы построены из атомов, закономерно расположенных в пространстве. Упорядоченное распределение атомов отличает кристаллическое состояние от некристаллического.

Математическая теория строения кристаллов была в основном разработана задолго до открытия рентгеноанализа, причем огромная роль в этом деле принадлежит Евграфу Степановичу. Исследование кристаллических структур рентгеновскими лучами подтвердило правильность ранее созданных стройных теоретических построений.

Прежде чем приступить к обзору достижений ученого, необходимо остановиться на том состоянии науки

о кристаллах, в котором он нашел ее, вступая на научное поприще.

Краткий исторический обзор развития кристаллографии, который мы собираемся сделать, покажет, какой большой вклад внесли русские ученые в науку о кристаллах. Имена М. В. Ломоносова, А. В. Гадолина, Н. И. Кокшарова, Ю. В. Вульфа золотыми буквами вписаны в эту главу естествознания. Однако первенствующая роль здесь, безусловно, принадлежит Е. С. Федорову.

Геометрически правильная форма кристаллов издавна поражала воображение наблюдателей. Недаром древние философы представляли себе мельчайшие элементарные частицы материи — атомы — в виде кубов, тетраэдров (четырёхгранников), октаэдров (восьмигранников) и икосаэдров (двадцатигранников), напоминающих кристаллические многогранники.

В средние века таинственным «угловатым природным телам», т. е. кристаллам, приписывались сверхъестественные, чудодейственные свойства. Однако начиная с XVII столетия ученые стали пристально вглядываться в загадочные кристаллические образования и вдумываться в их особенности. В 1619 г. великий немецкий астроном И. Кеплер (1571—1630) опубликовал трактат «О шестиугольном снеге». В нем мы находим замечательные мысли, несмотря на шуточную форму этого небольшого сочинения, которое сам Кеплер сравнивал с «забавой шаловливо щебечущего воробья». В частности, он высказал предположение о связи шестиугольной формы снежинок с узорами, составленными из шарообразных частиц (атомов), уложенных плотнейшим образом. Через пятьдесят лет современник и соперник Ньютона — английский физик Р. Гук (1635—1703) снова развил мысль о сложении кристаллов из шарообразных атомов. К такому выводу он пришел, рассматривая под микроскопом октаэдры квасцов и мельчайшие осколки алмаза с треугольными и шестиугольными очертаниями.

Следующим важным шагом науки о кристаллах явилось открытие закона постоянства углов между соответственными гранями и ребрами для кристаллов определенного вещества.

Изучение кристаллических многогранников показало, что рост их из растворов, расплавов или паров происходит путем наложения на грани все новых и новых слоев

кристаллизующегося вещества. Тем самым грани растущего кристалла как бы отодвигаются параллельно самим себе от начального центра кристаллизации (рис. 2). При этом наклоны между гранями остаются постоянными несмотря на то, что их размеры и очертания изменяются. Мало того, для всех кристаллов одного и того же вещества углы между соответственными гранями имеют строго определенные одинаковые величины.

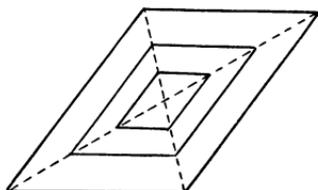


Рис. 2. Последовательные стадии роста кристалла.

Возьмем в качестве примера кристаллические многогранники кварца (рис. 3, а, б, в). На них всегда можно заметить два сорта граней: покрытых штрихами и без штрихов. Как показано на рис. 3, внешний вид таких кристаллов в связи с различными условиями роста весьма непостоянен: меняются и размеры самих кристаллов, и величина граней, и их контуры, и даже число граней.

Однако несмотря на это углы между гладкими и заштрихованными гранями во всех кристаллах кварца остаются одними и теми же. То же самое относится и к углам между двумя заштрихованными или двумя гладкими гранями. Ясно, что они являются характерными постоянными величинами для кварца. Как увидим далее, закон постоянства углов Федоров положил в основу своего кристаллохимического анализа, позволяющего по внешним граням кристалла определить его вещество. Этот закон, хотя и в очень неясной форме, был сформулирован в 1669 г. датским ученым Стено (1638—1687). Краткость высказываний Стено привела к тому, что его открытие не обратило на себя внимания.

В XVIII в. наш гениальный соотечественник М. В. Ломоносов (1711—1765) в трактате «О слоях земных» самостоятельно установил закон постоянства углов для кристаллов алмаза. В диссертации о селитре (1749) он пы-

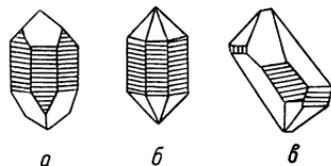


Рис. 3. Кристаллические многогранники кварца различной формы.

тался объяснить это явление при помощи теории кристаллического строения. Геометрически правильную форму кристаллов Ломоносов связывал с геометрически закономерным расположением атомов в пространстве. Так же, как Кеплер и Гук, он приписывал атомам («корпускулам») шарообразную форму. Согласно его теории, строение селитры может быть представлено совокупностью шарообразных корпускул, расположенных по одному и тому же плану во всех кристаллах этого вещества. Множество таких шариков образует кристаллические многогранники (рис. 4, а, б).

Расположенные вдоль плоскостей корпускулы настолько малы, что не улавливаются в отдельности, а воспринимаются в совокупности как плоские грани кристалла. Вследствие одинакового расположения атомов во всех кристаллах одного вещества одинаковыми будут и углы между соответственными гранями.

В данном вопросе Ломоносов намного опередил своих современников. К сожалению, его труды по кристаллографии в течение 150 лет были погребены в старинных библиотеках и пыльных архивах. Лишь сейчас мы можем по достоинству оценить их.

Двадцатью годами позже Ломоносова французский ученый Ж. Б. Ромэ Делиль (1736—1790) произвел многочисленные кристаллографические измерения, пользуясь специальным прибором для измерения углов — прикладным гониометром. С помощью этого незамысловатого инструмента, близкого к обыкновенному транспортеру, Ромэ Делиль измерил множество кристаллов и подтвердил закон постоянства кристаллических углов. «Усердный труженик на поприще науки», — по выражению Е. С. Федорова, Ромэ Делиль, в противоположность

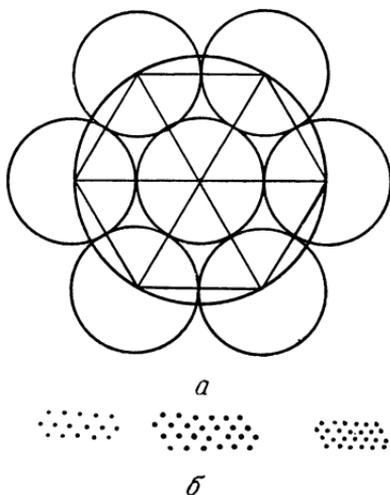


Рис. 4. Строение кристаллов селитры, по М. В. Ломоносову.

гениальному Ломоносову, чуждался каких бы то ни было научных обобщений и являлся ярким противником гипотетических построений. «Ограничимся же тем, что нам дается наблюдениями, если мы не хотим подменить плодами нашего воображения величественного молчания Природы относительно ее первичных элементов»,¹ — писал он.

Не таков был его младший соперник, современник французской буржуазной революции Р. Ж. Гаюи (1743—1826). При создании своей теории Гаюи исходил из спайности — способности кристаллов расщепляться или раскалываться вдоль определенных плоскостей. Теорию эту он создал, согласно историческому преданию, при следующих обстоятельствах. Случайно уронив на пол кристалл кальцита, минерала с отличной спайностью, ученый заметил, что кальцит рассыпался на мельчайшие спайные осколки. Рассмотрев их, Гаюи поспешно воскликнул: «Все найдено!». В этот момент в его уме сложилась теория кристаллического строения. Он прежде всего вспомнил о мельчайших частичках, атомах или молекулах, слагающих, по мысли древних философов, любое вещество. Вспомнил он также их высказывания относительно различной формы атомов в различных веществах. Естественно было предположить, что разбивая кристалл на все более и более мелкие спайные осколки, можно в конце концов прийти до мельчайших элементарных частиц — основных кирпичиков, строящих вещество.

Таким элементарным частицам Гаюи, исходя из явлений спайности, приписал многогранную форму, подобную форме спайных осколков. По его теории, кристаллы слагаются из молекулярных многогранников, которые дают в совокупности нечто вроде кирпичной кладки (рис. 5). Так, например, кристаллы поваренной соли, согласно Гаюи, состоят из молекул, имеющих форму мельчайших кубиков. Эти кубики, будучи равными и параллельно ориентированными, должны заполнять пространство без промежутков.

Само собой разумеется, что теория Гаюи была лишь ранней, весьма наивной попыткой проникнуть в сущность строения кристаллов.

¹ Николай С т е н о н. О твердом, естественно содержащемся в твердом. Изд. АН СССР, М.—Л., 1957 (серия «Классики науки»), стр. 143.

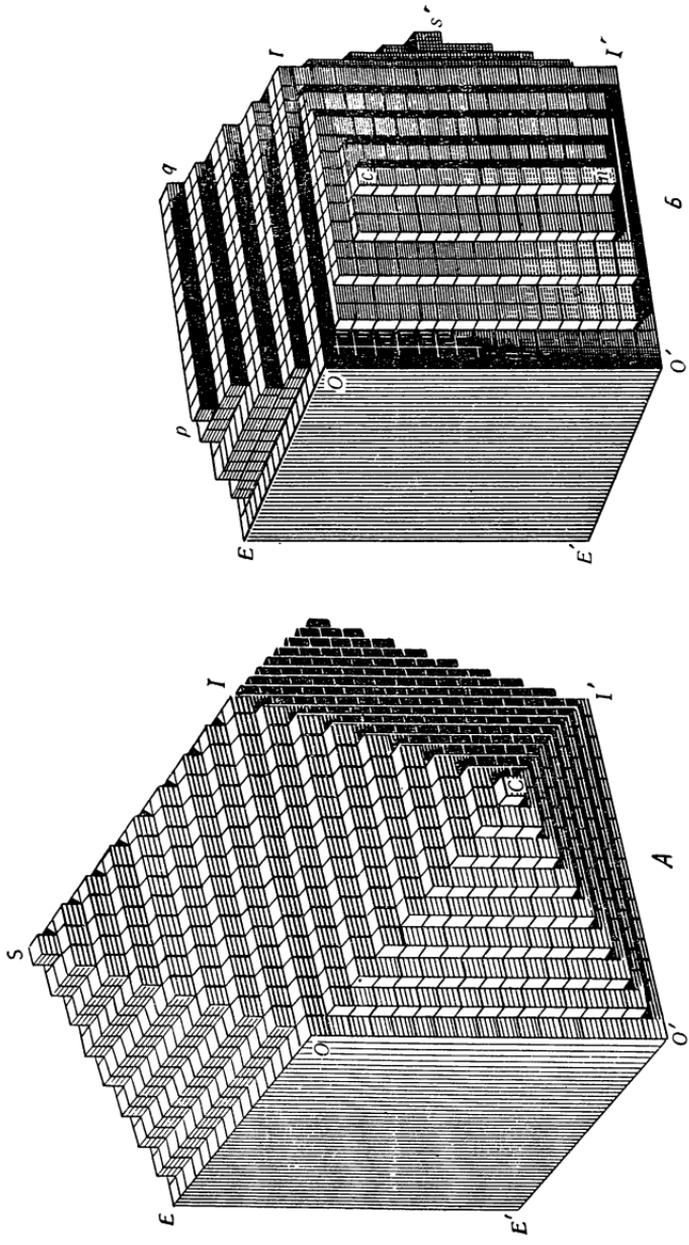


Рис. 5. Сложение ромбододекаэдра (А) и пентагон-дододекаэдра (Б) из первичных кубиков, по Р. Ж. Гаюи.

Вскоре после опубликования трудов Гаюи появились возражения против его теории. Указывалось, что реальные кристаллы сжимаются под влиянием давления и расширяются при нагревании. Такое явление не имело бы места, если бы кристаллы состояли из мельчайших кирпичиков, вплотную прилегающих друг к другу, как представлял себе Гаюи.

Однако Е. С. Федоров в одном из своих очерков справедливо заметил, что «сущность дела не в форме мельчайших слагающих элементов кристалла, а в их расположении». Пусть Кеплер, Гук и Ломоносов приписывали этим частицам форму шаров, а Гаюи — многогранников: форма придумывалась ими лишь для того, чтобы точнее выразить законы расположения элементарных частиц в пространстве. Поэтому можно пренебречь выдуманной формой и заняться лишь их пространственным расположением. За разрешение этой задачи и принялся французский морской офицер О. Браве (1811—1863), заинтересовавшийся формами все тех же снежинок и углубившийся в создание теории кристаллического строения. Браве исходил из одной особенности кристаллов, заключавшейся в том, что по параллельным направлениям свойства кристаллов одинаковы, тогда как вдоль непараллельных направлений те же свойства в общем случае являются различными.

Характерный пример такой особенности представляет слюда. Кристаллические пластины этого минерала легко расщепляются по плоскостям, параллельным его пластинчатости. Расщепить слюдяные пластины по другим направлениям значительно труднее.

В качестве другого примера может служить синеватый таблитчатый минерал дистен. Таблички его легко царапаются лезвием ножа в одном направлении, тогда как в других направлениях на тех же пластинках нож не оставляет никаких следов.

Принимая во внимание одинаковость свойств кристаллов вдоль параллельных направлений, можно предположить, что элементарные частицы, из которых они построены, располагаются по таким направлениям строго одинаково, и наоборот, по непараллельным направлениям расположение частиц в общем случае должно быть различным. Представив себе соответственное расположение центров тяжести таких частиц в пространстве, мы придем

к пространственной решетке, изображенной на рис. 6. Как видно, решетка эта состоит из множества параллелепипедов, равных, параллельно ориентированных и смежных по целым граням. Вершины параллелепипедов называются узлами решетки. С ними и совпадают центры тяжести элементарных частиц, из которых состоят кристаллы. В пространственной решетке различают плоские сетки — плоскости, по которым расположены частицы; и ряды — прямые, вдоль которых находятся те же частицы. Грани кристаллов соответствуют плоским сеткам, наиболее плотно усаженным частицами, ребра же отвечают плотным рядам решетки. Понятие о решетке кристаллов лежит в основе современной теоретической кристаллографии. Однако полное развитие этой теории мы находим впервые лишь в трудах Федорова. Кеплер, Гук, Ломоносов, Гаюи, Браве до некоторой степени являются предшественниками Федорова. К сожалению, имена

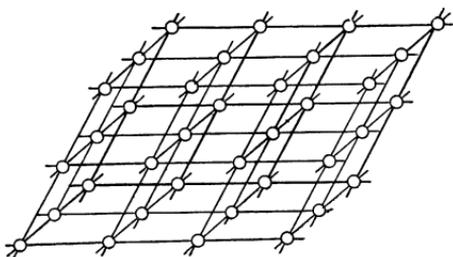


Рис. 6. Пространственная решетка.

их не пользовались признанием среди большинства ученых-кристаллографов прошлого столетия. Их теоретические построения считались ни на чем не основанными, беспочвенными фантазиями.

К середине прошлого столетия широкое распространение получила школа немецких кристаллографов Вейса и Науманна, противников атомистической теории. Вот как характеризует эту школу Е. С. Федоров: «Странно, что та в высшей степени несовершенная кристаллография, которая распространилась по всему ученому миру авторитетом Науманна, принималась везде как нечто непогрешимое и вечное. В общем, Вейс по сравнению с Гаюи был явным шагом назад, так как вместо систематического развития идеи, положенной Гаюи как надежное основание будущего здания, Вейс в значительной мере стал делать шаги ощупью, пытаясь без всякой руководящей идеи устанавливать законы, противоречащие природе вещей. Конечно, такие неудачные попытки двигаться ощупью

еще более дискредитировали всякие теоретические попытки. И вот наступил столь долго тянувшийся и столь упрочившийся науманновский период кристаллографии с почти полной научной бесплодностью». ²

Уже к середине XIX в. многочисленные исследователи собрали колоссальный фактический материал по кристаллографии. Среди них особенно выделялся русский академик Н. И. Кокшаров (1818—1892), автор классических «Материалов для минералогии России», изучивший и описавший огромное количество кристаллов русских минералов. Материал этот требовал обобщения и теоретического освещения. К сожалению, попытки отдельных ученых обобщить огромный материал, накопившийся путем долговременных наблюдений и исследований, совершенно терялись на фоне царившей формальной школы.

Иллюстрацией этому может служить печальная судьба марбургского профессора И. Ф. Гесселя (1796—1872), разработавшего, хотя и в очень тяжеловесной и неуклюжей форме, в 1830 г. учение о симметрии для конечных фигур, в том числе и для кристаллических многогранников. По словам Федорова, «поразительная неподготовленность большинства минералогов к восприятию идей, имеющих математическую подкладку, сделала бесполезным для науки труд Гесселя». ³ Сочинения этого ученого остались совершенно незамеченными. Лишь через шестьдесят лет после их опубликования кристаллографы заново открыли их. «В это время, — писал Федоров, — кости Гесселя давно успели рассыпаться и истлеть в могиле». ⁴

В 1867 г. наш соотечественник, профессор физики артиллерийского училища, академик А. В. Гадолин (1828—1892) дал свой вывод законов симметрии для кристаллических многогранников. Исключительная стройность и изящество изложения, простота и ясность доказательств, многочисленные примеры из области минералогии характеризуют замечательную работу Гадолина.

Однако и она долго не могла поколебать устоев главенствовавшей в то время формальной кристаллографической школы Науманна. В таком положении пребывала

² Е. С. Федоров. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, стр. 11.

³ Е. С. Федоров. О сочинениях немецкого минералога Гесселя. Зап. Минералог. общ., ч. 27, 1891, стр. 462.

⁴ Е. С. Федоров. Из итогов тридцатипятилетия, стр. 12.



Академик А. В. Гадолин
(1828—1892).

геометрическая кристаллография к моменту вступления на научное поприще Е. С. Федорова.

С самого начала своей деятельности Евграф Степанович подверг резкой критике работы формальной школы. Взамен ничем не связанных деталей и находимых на ощупь закономерностей кладет он в основу науки о кристаллах единый, строго геометрический базис. «Эта наука требует от своих приверженцев полной строгости в логических заключениях и не допускает ни малейшей произвольности и субъективности»,⁵ — пишет он. Работать в области кристаллографии, не будучи геометром, невозможно. Вот почему и первая его книга «Начала учения о фигурах» является прежде всего геометрической работой.

«В 1880 г. я после продолжительной отставки, многолетних и усиленных научных занятий, с толстой рукописью в руках вступил в качестве слушателя на третий курс Горного института. . . Для внешнего мира я был только студентом Горного института, а моя рукопись „Начала учения о фигурах“ не находила доступа в печать»;⁶ — так описал сам Е. С. Федоров свой приход в Горный институт.

О том, что его ожидало там, читатель узнает из следующей главы.



⁵ Е. С. Федоров. Курс кристаллографии. СПб., 1901, стр. 2.

⁶ Е. С. Федоров. Иван Васильевич Мушкетов. Ежегодн. по геолог. и минералог. России, 1902, т. VI, вып. 1, стр. 1.

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

Торжественно возвышается на берегу Невы великолепное творение зодчего Воронихина — здание Ленинградского горного института.

Немало прославленных деятелей русской культуры училось в его стенах. Развитие отечественного горного дела, изучение сокровищ земных недр, создание геологии СССР — все это неразрывно связано с историей этого старейшего высшего учебного заведения нашей страны.

Виднейшие ученые, первоклассные специалисты руководили здесь кафедрами, готовя молодые кадры горных инженеров. Недаром Горный институт издавна пользовался репутацией одного из самых лучших и вместе с тем и самых трудных учебных заведений.

Евграфа Степановича в первую очередь привлек сюда преподававшийся здесь курс кристаллографии и связанной с ним в прежние времена минералогии. Официальным представителем этих наук в Горном институте был известный профессор, впоследствии академик, Павел Владимирович Еремеев (1830—1899) — старательный исследователь кристаллов и минералов, неутомимый ученый труженик, ставивший на первое место точную регистрацию фактов.

Русская наука обязана Еремееву многочисленнейшими описаниями минералов нашей страны. Вместе с тем он славился и как опытный и искусный лектор. «Ясное изложение, умение показать кристаллы, овладеть вниманием аудитории, блестящие остроумия, рассыпанные в его занимательной и всегда поучительной речи, положи-

тельно увлекали нас»,¹ — пишет один из его слушателей.

Павел Владимирович Еремеев принадлежал к тому типу педагогов, которые стремятся внушить широким студенческим массам интерес к науке, давая им легко доступное и популярное изложение рассматриваемых вопросов. С большинством своих воспитанников он поддерживал отношения и по окончании курса. Бывшие его питомцы — горные инженеры, работавшие в самых глухих уголках России, — снабжали своего старого наставника новыми минералогическими находками, описание которых составляло предмет публикуемых им статей.

По-видимому, именно этой особенностью педагогического метода Еремеева, когда все внимание обращено на широкие круги учащихся, а не на отдельных, наиболее способных учеников, объясняется то, что после его смерти не осталось прямых продолжателей его научной работы. С этим же, очевидно, связано и необъяснимое, на первый взгляд, отношение Еремеева к Федорову. Труженик, но не творец науки, Павел Владимирович избегал теоретических обобщений. Ему была непонятна вся глубина федоровских теоретических построений. Сохранились даже указания на его ироническое отношение к своему гениальному ученику.

Так, в 1891 г. демонстрация федоровского теодолитного столика для микроскопа, создавшего целую эпоху в науке, вызвала со стороны Еремеева лишь едкую насмешку. Исследователю, привыкшему только описывать строго установленные факты, широкие обобщения и далеко опережавшие свое время изобретения казались бесплодными, ни на чем не основанными фантазиями. В воспоминаниях жены Евграфу Степановича рассказывается о том, как при упоминании о Федорове Еремеев обычно с ехидной улыбкой вращал палец около лба.

Со своей стороны и Е. С. Федоров недостаточно объективно ценил труды своего наставника. Вот какую характеристику его творчества дает он в Автобиографических записках: «В представлении Еремеева в области его специальности не было иных занятий, кроме повторения в сотый раз измерения кристаллов минералов, доставлен-

¹ Ф. И. Б р у с н и ц ы н. Воспоминания о П. В. Еремееве. Зап. Минералог. общ., ч. 37, 1899, стр. 24. Протоколы.



Академик П. В. Еремеев
(1830—1899).

ных инженерами из новых месторождений. Так как такое измерение возможно лишь благодаря некоторой зеркальности (блеску) граней кристаллов, то только этим, по его мнению, и поддерживалась возможность научной работы. По его образному выражению, „если бы не это, то пришлось бы закрыть лавочку“. Если же при этом измерении удавалось найти грани, не наблюдавшиеся другими, то это в его (как и многих других) представлении составляло чуть ли не великое открытие, тогда как на деле это было открытие случайности, то есть никакого научного значения не имело».²

Само собой разумеется, что сейчас мы не можем признать справедливой такую оценку. Богатейший фактический материал, собранный и описанный П. В. Еремевым, частично послужил впоследствии основой для теоретических обобщений самого Федорова. С этой же целью упомянутый материал используется и теперь.

Не совсем прав Е. С. Федоров и в своем насмешливом отзыве о нахождении новых граней на кристаллах минералов. Сейчас эти грани снова начинают привлекать пристальное внимание минералогов в качестве признаков, характеризующих особенности условий минералообразования.

Как видим, учитель и ученик, принадлежавшие к различным научным течениям, в пылу разногласий не хотели, да и не могли, по существу дела, понять и оценить друг друга. Старая описательная минералогия в лице П. В. Еремеева всеми силами протестовала против появления федоровской теоретической кристаллографии. Со своей стороны, молодой Федоров, уже сделавший свои первые обобщения, с юношеской горячностью отрицал какое бы то ни было значение заслуг своего предшественника. Ясно, что попытка Федорова познакомить Еремеева со своими «Началами учения о фигурах» потерпела полный крах. Последний оказался не в состоянии не только оценить, но и понять выводы начинающего ученого. «Не в коня корм», — шутливо определил он свое участие в этом деле.

Не мог понять значения работ Федорова и другой крупнейший минералог того времени — всемирно зна-

² Е. С. Федоров. И[мператорская] П[етербургская] Академия наук. Автобиографические записки, воспоминания и характеристики. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 1, № 22.



Академик Н. И. Кокшаров
(1818—1892).

менитый академик Николай Иванович Кокшаров (1818—1892). Один из основоположников русской точной описательной минералогии, неутомимый исследователь кристаллов, автор одиннадцатитомного классического труда «Материалы для минералогии России», Кокшаров принадлежал к той же научной школе, что и его последователь Еремеев. Точные измерения углов на кристаллах и скрупулезные описания ставились им превыше всего. Ученик славившихся в свое время немецких представителей кристаллографо-минералогической описательной школы — Вейса и Науманна, — он до конца своей жизни остался верным их поклонником, не позволявшим себе в теоретических суждениях выходить за установленные ими рамки. Научная деятельность не мешала ему одновременно быть и довольно ловким царедворцем, преуспевавшим не на одном только академическом поприще. Избалованный своими успехами, осыпанный почестями, в нарядном мундире, украшенном множеством орденов, Кокшаров появлялся в Горном институте лишь эпизодически, на экзаменах. В противоположность саркастически настроенному желчному Еремееву он обычно ограничивался лишь несколькими добродушными шутками, предпочитая мирно дремать в экзаменаторском кресле. Может быть, именно в силу личных особенностей Кокшарова первая кристаллографическая работа Федорова не была и не могла быть понята им, — учитель и ученик принадлежали двум разным эпохам.

Итак, среди профессоров, возглавлявших в Горном институте кристаллографию и минералогию, Евграф Степанович не нашел нужной ему поддержки. Не был своевременно оценен его первый труд и в математических кругах. Даже крупнейший математик, академик П. Л. Чебышев, к которому обратился молодой кристаллограф, отказался просмотреть рукопись, мотивируя это тем, что «данным отделом современная наука не интересуется». Прошло немало времени, прежде чем замечательное сочинение Федорова обратило на себя внимание и удостоилось опубликования.

Большую роль в судьбе молодого ученого сыграло Петербургское минералогическое общество. Это знаменитое старейшее научное общество, существующее и сейчас, оказало огромное влияние на развитие минералогии и кристаллографии в нашей стране. Его открытие в ян-

варе 1817 г. явилось знаменательной датой в истории русской науки. С самого начала своей деятельности Минералогическое общество стремилось охватить весьма широкий круг вопросов. «Предмет, которым сие общество предполагает заниматься, есть Минералогия во всем пространстве сего слова», — читаем мы в его старинном уставе. Это значит, что члены общества, не ограничиваясь узкими рамками собственно минералогии, стремились развивать и сопредельные с ней науки, среди которых в то время на первом месте стояла кристаллография. Во внушительной шеренге томов печатных трудов общества, а в том числе и в его известных «Записках», выходящих и в настоящее время, в изобилии накоплены данные по минералогии, петрографии (учении о горных породах), геологии, учению о полезных ископаемых, кристаллографии, нередко составляющие украшение мировой науки. Минералогическое общество всегда состояло в тесной связи с Горным институтом. Мало того, с середины прошлого столетия оно помещалось в самом здании Института, где продолжает находиться и сейчас.

В помещении, украшенном портретами старинных «людей камня», среди шкафов с их трудами, выступали со своими научными сообщениями многие виднейшие наши минералоги, геологи, кристаллографы. Здесь за долгие годы прошли прекрасную школу сотни молодых ученых.

Еще будучи студентом Евграф Степанович начал выступать на собраниях этого прославленного общества с сообщениями о своих выводах в области кристаллографии. Директором Минералогического общества в тот период был академик Кокшаров, секретарем — профессор Еремеев. В число почетных членов общества входил и академик А. В. Гадолин. Крупный военный теоретик, профессор Петербургского артиллерийского училища, он занимался минералогией и кристаллографией лишь как любитель. И однако именно Гадолин первый признал в Федорове талант человека, открывающего с помощью математических построений законы, управляющие миром кристаллов. По его настоянию «Начала учения о фигурах» увидели свет в «Записках Минералогического общества» за 1885 г.

Научные занятия Евграфа Степановича не мешали ему успешно справляться с курсом Горного института. Блестящие способности Федорова ярко проявились и

здесь. Сказалось, конечно, и то, что в стены института он вступил уже не юношей, а двадцатисемилетним семейным человеком с вполне определившимися научными интересами и отличной подготовкой.

В июне 1883 г. Федоров окончил Горный институт первым по списку. Имя его было занесено на мраморную доску. Однако и тогда исключительные дарования молодого ученого не нашли официальной поддержки. Профессор Еремеев не пожелал оставить Евграфа Степановича при своей кафедре. Недоброжелательно отнеслись к нему и некоторые другие профессора.

Небезынтересен в этом отношении случай, отмеченный в «Воспоминаниях» жены Федорова. На экзамене профессор механики указал экзаменовавшемуся Федорову на якобы допущенную им в математических выкладках ошибку. Евграф Степанович доказал экзаменатору правильность своего решения. Этот инцидент, однако, не был забыт злопамятным профессором. Когда через несколько лет Федоров преподнес ему свою только что напечатанную работу «Формулы аналитической геометрии в улучшенном виде», последний, взглянув лишь на заглавие, демонстративно разорвал ее на части. Свой поступок он объяснял впоследствии тем, что название федоровского труда показалось ему непростительно дерзким. Как мог начинающий ученый браться улучшать классические формулы аналитической геометрии? «Если бы это было возможно, иностранцы давно бы это уже проделали».

Казалось бы, все препятствовало тому, чтобы Федоров мог всецело посвятить себя науке.

В автобиографии ученый рассказывает о том, как профессора уговаривали его стать практическим инженером и бросить научные изыскания, расценивавшиеся ими как заблуждения молодости. Однако Евграф Степанович твердо держался намеченного им пути и непреклонно отстаивал свои взгляды. С самого начала он выступил как смелый новатор и реформатор избранной им науки. Вот что читаем мы в протоколе заседания Минералогического общества от 16 ноября 1883 г.: «Действительный член, горный инженер Е. С. Федоров, бросив общий взгляд на предшествующую историю минералогии, из которого выходит, что до сих пор предметом исследования в этой области было главным образом лишь становившееся все более и более точным описание минералов, выражает



Е. С. Федоров в 1883 г.
(год окончания Горного института).

мнение, что этот формальный период науки уже завершился, и что теперь усилия ученых обращаются к выяснению действующих причин, для чего понадобилась выработка более отвлеченных понятий и содействие математики». ³ Вряд ли такое выступление пришлось по вкусу представителям описательной минералогии. Можно себе представить, как возмущали их подобные высказывания, шедшие вразрез с твердо установившимися понятиями и взглядами. И все же им пришлось уступить энергичному поватору. В 1885 г. в 21-м томе «Записок Минералогического общества» увидела свет первая обширная монография Е. С. Федорова — «Начала учения о фигурах».

³ Зап. С.-Петербур. минералог. общ., 2-я сер., 1883, ч. 18, стр. 281.

ПЕРВАЯ КНИГА — «НАЧАЛА УЧЕНИЯ О ФИГУРАХ»

«Кристаллографы не нашли у чистых математиков разработанными многие из тех отделов, без которых не могла обойтись кристаллография в своем поступательном движении, и волей-неволей им приходилось самим браться за разработку таких отделов. Достаточно указать на учение о фигурах вообще, и в особенности на учение о симметрии, учение о сингонии, учение о правильном выполнении плоскости и пространства — все учения чисто математические, но оставшиеся мало или отчасти абсолютно не затронутыми чистыми математиками. Не только значительные части этих учений были вообще разработаны кристаллографами, но некоторым из них этими специалистами положены первые основные камни».¹

Когда 56-летний Федоров писал эти строки, он прежде всего думал о своей роли в развитии математической кристаллографии и о своей первой книге — «Начала учения о фигурах». Напомним еще раз основные моменты создания этого капитального труда.

Замысел написания книги относится к 1869 г., т. е. к моменту ухода шестнадцатилетнего Федорова из военной гимназии и поступления его в инженерное училище. «Вот эта-то, казалось бы, чисто математическая гармония и заняла мой ум в начале моих робких научных попыток, 35 лет тому назад»,² — писал впоследствии Евграф Степанович. Из Автобиографических записок мы узнаем, что в 1879 г. работа была в основном закончена. В 1880 г., опять-таки по свидетельству самого ученого, он пришел

¹ Е. С. Федоров. Кристаллография за сорок лет. Зап. Горн. инст., 1910, т. 2, вып. 5, стр. 364.

² Е. С. Федоров. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, стр. 2.

в Горный институт уже «с толстой рукописью в руках». Окончательно книга была готова к печати в 1883 г. Итак, в общей сложности «Начала учения о фигурах» создавались в течение четырнадцати лет. Обширная рукопись начинающего автора (280 печатных страниц и 200 чертежей) уже одним своим объемом отпугивала маститых профессоров, к которым он обращался.

Известную роль в таком недоверии сыграло и то, что чисто геометрическое сочинение принадлежало перу не специалиста-математика, а студента-горняка.

Мы уже знаем, что эта работа не встретила поддержки у официальных представителей кристаллографии и минералогии. Не приветствовали ее и математики. Евграф Степанович с горечью отмечает это в предисловии к «Началам»: «Когда в первый раз (в 1881 г.) я представил свой труд в здешнюю Академию наук, в лице академика г. Чебышева, то последний отказался принять его, мотивируя свой отказ тем, что этим отделом современная математика не интересуется».³ Чем объясняется недооценка одним из наиболее выдающихся наших математиков замечательного федоровского труда? Частичный ответ на такой вопрос мы находим в недавно опубликованной статье проф. Б. Н. Делоне «Е. С. Федоров как геометр». Ставя Е. С. Федорова совместно с Н. И. Лобачевским в ряд «геометров мирового значения», он вместе с тем пишет: «Изложение геометрических вопросов у Федорова обыкновенно таково, что математик приходит в недоумение. Его определения и доказательства с математической точки зрения большей частью нестроги и неполны. В особенности это относится к знаменитой книге „Начала учения о фигурах“. Это первое, еще юношеское, большое творение Федорова, над совершенствованием которого он долго работал».⁴ Отрицательное отношение П. Л. Чебышева к федоровскому сочинению Б. Н. Делоне объясняет тем, что «работа Федорова была математической, но написана она была для математика как-то странно». Однако, вслед за этим он пишет: «Тем не менее, книга Федорова „Начала учения о фигурах“ одно из самых замечательных геометрических творений. Эта книга имела и сейчас имеет большое

³ Е. С. Федоров. Начала учения о фигурах. Изд. АН СССР, 1953 (серия «Классики науки»), М.—Л., стр. 19.

⁴ Б. Н. Делоне. Е. С. Федоров как геометр. Тр. Инст. истории естествознания и техники АН СССР, т. 10, 1956, стр. 5.

значение для кристаллографии и для математики». ⁵ Последняя фраза и дает ключ к разгадке непризнания федоровских «Начал». Думается, что недооценка этого труда была связана с одной из чудесных особенностей таланта его автора, отмеченной акад. А. Е. Ферсманом. Эта особенность состоит «в умении вносить методы и завоевания одной науки в область научного творчества в другой». ⁶

Первая книга Федорова принадлежит одновременно и к геометрии и к кристаллографии. Реальное проявление выведенных им геометрических положений мы находим в мире кристаллов. Этого не могли оценить математики того времени. С другой стороны, старые кристаллографы и минералоги имели слишком слабую математическую подготовку для того, чтобы признать федоровские выводы.

Большой удачей для молодого Федорова было то, что акад. А. В. Гадолин, работавший над вопросами симметрии, заинтересовался книгой молодого ученого и настоял на ее опубликовании.

В 1885 г. «Начала учения о фигурах» после долгих мытарств увидели свет. За это время часть выводов и положений русского кристаллографа была повторена зарубежными учеными. С горечью писал впоследствии Евграф Степанович о том, что в связи с задержкой в печатании его книги стал спорным приоритет по некоторым существенным вопросам, впервые решенным в России.

Что же представляла собой эта первая крупная монография Федорова? «Начала учения о фигурах» составляли целиком содержание 21-го тома Записок Минералогического общества. С первого взгляда может показаться странным, что среди томов минералогического журнала, заполненных главным образом статьями по описательной минералогии, геологии и петрографии, нашел себе место и федоровский труд, посвященный, как будто, чисто геометрическим вопросам. Легко вообразить себе то удивление, с которым минералоги и геологи разрезали листы этого необычайного тома, заключенного в привычную им бледно-голубую бумажную обложку.

Нельзя не отдать чести дальновидности и смелости издателей журнала, включивших в свое издание моно-

⁵ Там же, стр. 6.

⁶ А. Е. Ферсман. Памяти Евграфа Степановича Федорова. Природа, 1919, № 4/6, стб. 240.

графию Евграфа Степановича. Ведь тогда еще невозможно было предугадать все значение этой работы для дальнейшего развития науки о кристаллах, так же, как нельзя было предвидеть весь колоссальный размах будущего творчества Федорова.

Вот как впоследствии характеризовал он сам свою первую книгу: «Сочинение это не требует никаких предварительных сведений, кроме элементарной геометрии, и составляет, в сущности, не что иное, как дополнительный курс этой науки, упускаясь по странной нелогичности истории науки в течение столь многих столетий. В основе всего изложенного лежит понятие об измерении телесного угла, совершенно аналогично тому, как выводы планиметрии имеют в основании понятия об измерении плоских углов. Кроме общих оснований учения о фигурах, здесь изложены начала учения о симметрии, о поясах, о выполнении плоскости и пространства равными фигурами и о многогранниках высшей степени. Сочинение это излагает, между прочим, все те части учения о фигурах, которые составляют основание современной кристаллографии и отсутствие которых делало до сих пор из кристаллографии сборник геометрических истин, будто бы выводимых из опыта».⁷

В другом месте, отмечая значение своего труда в деле развития науки о кристаллах, Федоров пишет: «В результате явилась такая коренная переработка кристаллографии, после которой последняя стала наукой рациональной, математического характера, по точности метода могущей быть поставленной рядом с теоретической механикой».

«Это направление теоретической кристаллографии имело основанием учение о фигурах — часть геометрии, почти совершенно упущенную чистыми математиками, из которой кристаллографы уже успели собрать обильную жатву».⁸

Нельзя не вспомнить еще о словах Федорова, когда он рассказывал о причинах, побудивших его приняться за разработку учения о фигурах. «Пришел я к этой теме, — говорил Евграф Степанович, — исходя из наслаждений,

⁷ Е. С. Федоров. Курс кристаллографии. СПб., 1897, стр. XIII.

⁸ Там же, стр. IX.

испытанных мной при ближайшем изучении изящных соотношений между геометрическими фигурами; изучение же было вызвано отчетливым сознанием аналогии между тем, что мы называем телесными или пространственными фигурами (трех измерений) и фигурами на плоскости (двух измерений). Нельзя было с первого же взгляда не заметить того удивительного невнимания, почти пренебрежения, которое в интеллекте даже людей чистой науки выпало на долю первых по сравнению со вторыми. Здравый смысл требовал бы обратного, так как при всей аналогии разнообразие самих фигур и связанных с ними вопросов геометрии несравненно больше в вопросах, касающихся пространства, чем плоскости».⁹

После всего сказанного можно перейти к более детальному обзору монографии.

Книга Федорова открывается предисловием. В нем отмечается, что история развития учения о фигурах «полна странностями». «Самой же большой странностью является то обстоятельство, что этот в высшей степени простой отдел элементарной геометрии, каковы впрочем и все ее отделы, но в то же время полный математического изящества в такой мере, какой может быть не обладает никакой другой отдел того же предмета, остается до сего времени совершенно неразработанным».¹⁰ Евграф Степанович указывает на большое практическое значение данного отдела, главным образом, для кристаллографии и минералогии (в то время обе эти науки еще не разделялись специалистами).

Практическая потребность в учении о пространственных фигурах побудила взяться за его разработку представителей других наук и в первую очередь минералогии. Такое «вмешательство» не могло не привести к неполноте и неудовлетворительности полученных данных. Кроме того, приемы, употребляемые нематематиками, нередко «граничили с выводами ошупью». Большую роль в этом сыграло также и то, что математики часто не имели понятия о результатах, достигнутых минералогами, а последние, в свою очередь, слабо ориентировались в математических достижениях. Поэтому история развития учения о фигурах изобилует повторениями открытий.

⁹ Е. С. Федоров. Из итогов тридцатипятилетия, стр. 2.

¹⁰ Е. С. Федоров. Начала, стр. 15.

«Повторения открытий, — пишет Федоров, — представляют собой такую запутанную сеть, для распутывания которой нехватило бы сил единичного лица».¹¹

Особенно подчеркивает он совершенную неразработанность вопроса о заполнении пространства равными фигурами, несмотря на то, что этот отдел представляет огромный интерес для кристаллографов, давая основу теории кристаллической структуры. Честь разработки геометрического учения о заполнении пространства принадлежит всецело самому Федорову. В дальнейшем, базируясь на этом учении, он развил свою теорию строения кристаллов.

Все вышеуказанное привело ученого к мысли о необходимости строго математической планомерной разработки учения о фигурах. Результатом такой работы и явилась его книга. Обращаясь к ней, Федоров подчеркивал самостоятельность и оригинальность большинства сделанных им выводов. Большое внимание уделил он рациональности и однозначности в области терминологии.

Лейтмотивом всего сочинения является следующее, уже упоминавшееся выше положение, неоднократно подчеркиваемое самим автором и проходящее красной нитью через всю его книгу: «В основе произведения лежит отчетливое сознание аналогии, существующей между плоскими и телесными фигурами, и потому, как плоский угол является основным строительным элементом плоских фигур, так и в предлагаемом произведении все главные выводы строятся на изучении телесного угла как строительного элемента телесных фигур».¹² Этому элементу Федоров дал новое название — «гоноэдр».

Заканчивая предисловие к своей книге, он отмечает, что его труд «представляет первую попытку систематического изложения всех существенных отделов элементарного учения о телесных фигурах».¹³

Первый из пяти отделов монографии посвящен «фигурам открытым», т. е. пространственным фигурам, не образующим замкнутых многогранников. В нем даны основные понятия и определения, касающиеся телесных углов (гоноэдров) и их измерения. Отдел начинается определением трехгранного угла (трехгранный угол —

¹¹ Там же, стр. 16.

¹² Там же, стр. 20.

¹³ Там же, стр. 21.

«безграничная часть пространства, заключающаяся между тремя пересекающимися плоскостями»).

Затем на основании ряда теорем Федоров вскрывает аналогию между свойствами трехгранных углов и плоских, а также сферических треугольников. В самом деле, дуги, получающиеся от пересечения плоскостей трехгранного угла с шаровой поверхностью, описанной из его вершины, как из центра, образуют сферический треугольник. Стороны последнего измеряют плоские углы трехгранного угла, углы сферического треугольника соответствуют двугранным углам телесного трехгранного угла, а вершины — его ребрам. Поэтому изучение трехгранных углов может быть сведено к изучению сферических треугольников.

Далее Федоров переходит к многогранным углам (многогранный угол — «безграничная часть пространства, заключающаяся между несколькими плоскостями, пересекающимися в одной точке, называемой вершиной угла»¹⁴). В последующем изложении термины «трехгранный угол» и «многогранный угол» объединяются под одним общим термином — «гоноэдр» («гоноиа» — по-гречески «угол», «эдра» — «грань»).

Для того чтобы отличать гоноэдры по числу их граней, Федоров в качестве приставок пользуется греческими числительными — «три» (три), «тетра» (четыре), «пента» (пять), «гекса» (шесть) и т. д. Так, например, «тригоноэдром» называется трехгранный угол, «тетрагоноэдром» — четырехгранный угол, и т. д.

Изучение гоноэдров легко сводится к изучению сферических многоугольников. Действительно, если описать из вершины гоноэдра, как из центра, сферу, то дуги, получающиеся в результате пересечения плоскостей гоноэдра с поверхностью шара, образуют сферический многоугольник. Стороны последнего измеряют плоские углы гоноэдра, его углы соответствуют двугранным углам, его вершины — ребрам гоноэдра. Особенное внимание обращается на то, что каждый гоноэдр может быть разбит на тригоноэдры, поэтому в конце концов изучение гоноэдров сводится к изучению составляющих их тригоноэдров.

¹⁴ Там же, стр. 34.

Стройный ряд определений, теорем и следствий, составляющий содержание первых двух глав труда, завершается описанием элементарного способа определения величин гоноэдров и конических углов.

Помимо общего геометрического значения, выводы Федорова имеют большое значение в области кристаллографии.

Последнее становится ясным, если вспомнить основной закон кристаллографии — закон постоянства углов, справедливый для всех без исключения кристаллических многогранников, образующихся как в природных, так и в лабораторных условиях.

Закон этот относится и к телесным, и к двугранным, и к плоским углам кристаллов. Отсюда ясно все значение федоровских выводов, выясняющих взаимную связь между ними.

Второй отдел книги посвящен «сомкнутым» пространственным фигурам, отвечающим замкнутым многогранникам. Открывается он описанием наиболее простого из всех многогранников — «сфеноида» (сфеноид — «часть пространства, ограниченная четырьмя не пересекающимися в одной точке плоскостями»¹⁵). Когда все четыре грани сфеноида являются правильными треугольниками, мы получаем правильный (кубический) тетраэдр.

Сфеноид в пространстве играет такую же роль, как треугольник на плоскости. Это самая простая из всех возможных пространственных фигур. Так же, как всякую плоскую фигуру можно подразделить на треугольники, так и всякую пространственную фигуру можно подразделить на сфеноиды. Для этого, например, достаточно взять внутри многогранника какую-либо точку и соединить ее со всеми вершинами многогранника.

В основу изложения главы о сомкнутых фигурах Федоров кладет разработанные им понятия «типических» и «подтипических» многогранников.

Типический многогранник строится из многогранника следующим образом. Из центра шара, произвольно помещенного в пространстве и имеющего произвольный радиус, проводятся прямые, перпендикулярные ко всем граням данного многогранника, до пересечения с шаровой поверхностью. Через полученные при этом точки прово-

¹⁵ Там же, стр. 63.

дятся плоскости, касательные к шару. Продолжая такие плоскости до взаимного пересечения, мы и получим типический многогранник.

Все многогранники, образующие геометрически подобные типические многогранники, Федоров относит к одному виду многогранников. Многогранники, принадлежащие к одному и тому же виду, имеют одно и то же истинное число вершин, одно и то же истинное число телесных углов, двугранных и плоских углов, одно и то же число граней и истинное число ребер. (Под термином «истинное число» подразумевается то число, которое относится к соответственному типическому многограннику). Далее вводится понятие о подтипическом многограннике.

«Многогранником подтипическим по отношению к данному виду многогранников, — пишет Евграф Степанович, — называется такой, вершины которого суть точки касания типического».¹⁶ Многогранник подтипический имеет число вершин, равное числу граней типического многогранника, число граней, равное числу его вершин и одно и то же с ним число ребер. Возьмем два хорошо известных еще из элементарной геометрии многогранника — куб и октаэдр. В кубе имеется шесть граней, восемь вершин и двенадцать ребер. Октаэдр обладает восемью гранями, шестью вершинами и двенадцатью ребрами. Здесь уместно вспомнить как курьез, что И. Кеплер в трактате «О шестиугольном снеге» (1619 г.), сравнивая куб и октаэдр с мужем и женой, писал, что «среди правильных твердых фигур первой является куб, родитель всех прочих фигур. Октаэдр же, так сказать, как бы его жена, так как имеет столько же вершин, сколько кубических граней». Итак, число граней куба равно числу вершин октаэдра, и, наоборот, число вершин куба равно числу граней октаэдра. Вместе с тем число ребер в обоих многогранниках одинаково. Следовательно, если куб является типическим многогранником, то подтипическим многогранником будет октаэдр. А в случае, если октаэдр играет роль типического многогранника, то подтипическим ему многогранником будет куб (рис. 7).

Далее Федоров вводит понятие об «изоэдрах» и «изогонах». Изоэдром называется такой многогранник, все грани которого равны или симметричны между собой.

¹⁶ Там же, стр. 84.

Изогоном называется многогранник, у которого все телесные углы (гоноэдры) равны или симметричны.

Многогранник подтипический относительно изоэдра является изогоном, и, наоборот, многогранник типический по отношению к изоgonу представляет изоэдр.

Основываясь на ряде выведенных им важнейших теорем, Федоров дает полный вывод всех возможных изогонов и типических изоэдров, а также их классификацию.

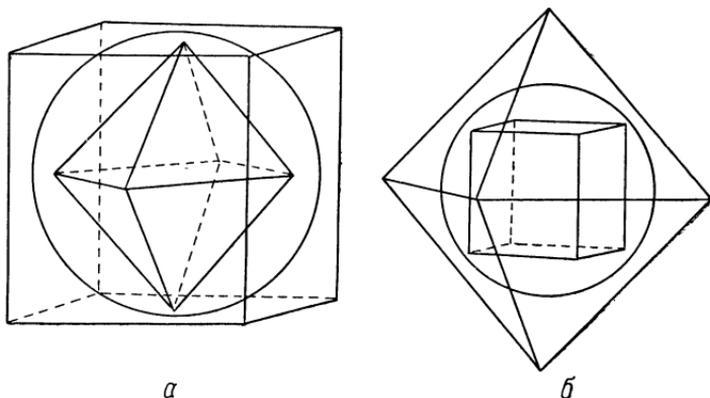


Рис. 7. Типические и подтипические многогранники.

a — типический многогранник — куб, подтипический многогранник — октаэдр; *б* — типический многогранник — октаэдр, подтипический многогранник — куб.

Изогоны подразделяются, согласно этой классификации, на тригоноэдрические, тетрагоноэдрические и пентагоноэдрические (т. е. на многогранники с трехгранными, четырехгранными и пятигранными телесными углами). Соответственные изоэдры называются тригональными, тетрагональными, пентагональными (название указывает на наличие треугольных, четырехугольных и пятиугольных граней). Так, например, куб принадлежит к тригоноэдрическим изогонам, а октаэдр является соответственным тригональным изоэдром. Все остальные многогранники, разбиваясь по видам, распределяются между изогонами и изоэдрами, выведенными Федоровым.

Характеризуя свою классификацию многогранников, Евграф Степанович пишет: «Не имея возможности подробно излагать здесь преимуществ, делающих класси-

фикацию по граням единственно возможной общей классификацией, я выражу только уверенность в том, что всякий прочитавший мое произведение согласится в этом со мной. Вот почему я считаю ее естественной классификацией, то есть такой, которая имеет преимущества перед другими во всех отношениях». ¹⁷

Нельзя не отметить, что учение о многогранниках, развитое Федоровым, помимо своего чисто геометрического значения, представляло в свое время огромный интерес для кристаллографов.

Так называемые простые формы кристаллов, состоящие из равных или симметричных граней и образующие замкнутые многогранники, целиком принадлежат к федоровским «изоэдрам». Просматривая названия выведенных им изоэдров и изогонов, мы встречаемся с терминами, хорошо известными нам по учебникам кристаллографии («скаленоэдры», «пирамидальные тетраэдры и октаэдры», «гексаоктаэдры» и т. п.). Дав полный вывод таких многогранников и подчинив их строго математической классификации, Федоров тем самым подвел непогрешимый геометрический базис под учение о формах природных многогранников — кристаллов.

С этой же точки зрения первостепенное значение имеет следующий, третий отдел его книги, посвященный учению о симметрии. «Кристаллы блещут симметрией», — писал впоследствии Евграф Степанович в «Курсе кристаллографии». В самом деле, такие кристаллические образования, как снежные звездочки или кубики поваренной соли, являются высоко симметричными телами.

Согласно геометрическим представлениям, симметричные фигуры должны состоять из равных или зеркально равных, собственно симметричных частей (при зеркальном равенстве одна часть симметричной фигуры относится к другой, как предмет и его зеркальное отражение. Примером такого равенства могут служить наши руки — правая и левая). Равные и зеркально равные части симметричных фигур располагаются относительно друг друга строго закономерно. Так, например, одинаковые части снежинки, изображенной на рис. 8, повторяются шесть раз вокруг прямой линии, которую мы можем мысленно провести перпендикулярно плоскости рисунка через его

¹⁷ Там же, стр. 173.

центр. Долгое время математические законы симметрии оставались неразгаданными. Лишь к концу прошлого столетия знание их достигло полного расцвета. Несмотря на то что учение о симметрии относится к геометрии, основные успехи в этой области были получены преимущественно благодаря трудам кристаллографов. Это и понятно: имея дело с кристаллами, одной из главнейших особенностей которых является симметрия, их исследователи задолго до математиков почувствовали необходимость развития данного раздела геометрии. Остановимся сперва на симметрии конечных фигур. Как уже указывалось, равные и зеркально равные части симметричных фигур располагаются строго закономерно относительно друг друга. Для того чтобы выявить указанную закономерность, удобно пользоваться воображаемыми вспомогательными геометрическими образами: точками, прямыми,

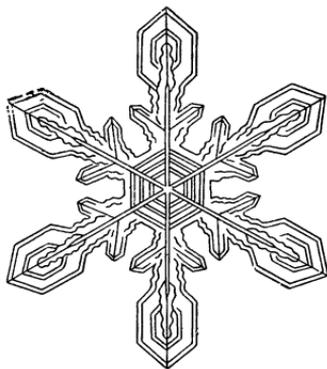


Рис. 8. Снежная звездочка.

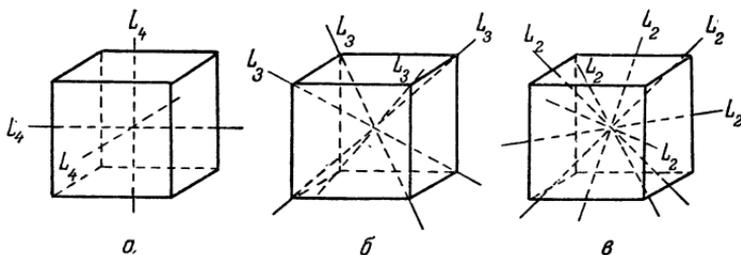


Рис. 9. Оси симметрии куба. Куб обладает тремя четверными (а), четырьмя тройными (б) и шестью двойными (в) осями симметрии.

плоскостями, которые называются элементами симметрии. Так, например, на рис. 8 прямая, проведенная через центр снежной звездочки, перпендикулярно плоскости чертежа, является особой прямой — осью симметрии

шестого порядка, вокруг которой шесть раз повторяются одинаковые части снежинки. Вертикальная прямая, проходящая через центр куба на рис. 9, а, соответствует оси симметрии четвертого порядка. Вокруг нее четыре раза повторяются одинаковые грани, ребра, вершины и плоские углы куба. Внимательное изучение того же куба показывает, что в нем присутствует не одна ось четвертого порядка. Куб имеет шесть одинаковых квадратных граней. Перпендикуляр к каждой паре таких граней, проходящий через их середины, является осью четвертого порядка. Следовательно, в кубе находим три оси симметрии четвертого порядка (рис. 9, а). Мало того, рассматривая вершину куба, обнаруживаем, что в ней пересекаются три одинаковых ребра, сходятся три одинаковые грани. Следовательно, здесь выходит ось симметрии третьего порядка. Легко сообразить, что через каждую пару вершин вдоль телесной диагонали куба проходит такая тройная ось. Так как в кубе имеется восемь вершин, то всего получим четыре тройные оси (рис. 9, б). Подобным же образом убедимся в наличии двойных осей, проходящих через средние точки двух противоположных ребер. Двенадцати ребрам куба соответствует всего шесть двойных осей симметрии (рис. 9, в).

Помимо осей, имеются и другие элементы симметрии, например воображаемая плоскость, делящая симметричную фигуру на две зеркально равные части — правую и левую. Части эти расположены относительно друг друга, как предмет и его зеркальное изображение. Такой плоскостью симметрии обладает тело человека, млекопитающих, рыб, птиц. В кубе можно провести всего девять плоскостей симметрии (рис. 10), в многограннике, имеющем форму кирпичика или спичечной коробки, — три, в человеческом теле — одну.

Необходимо упомянуть еще один элемент симметрии — особую точку, при наличии которой каждой грани многогранника соответствует равная и параллельная парная грань. Это так называемый центр инверсии. Легко сообразить, что центром инверсии обладают и куб, и многогранник в форме кирпичика.

На основании вышесказанного можно представить себе полную совокупность элементов симметрии куба. Она состоит из трех четверных ($3 L_4$), четырех тройных

(4 L_3) и шести двойных осей (6 L_2), девяти плоскостей симметрии (9 P) и центра инверсии (C). Условно это пишется так: $3L_4, 4L_3, 6L_2, 9P, C$. Совокупность элементов симметрии для многогранника в форме кирпича такова: $3L_2, 3P, C$.

Существуют еще и «сложные оси симметрии», действующие как совокупность оси и плоскости симметрии или оси и центра инверсии. Общая для всех симметричных фигур закономерность состоит в том, что после некоторой операции, называемой симметрическим преобразованием, симметричная фигура занимает в пространстве то же положение, которое она занимала и до этой операции. Од-

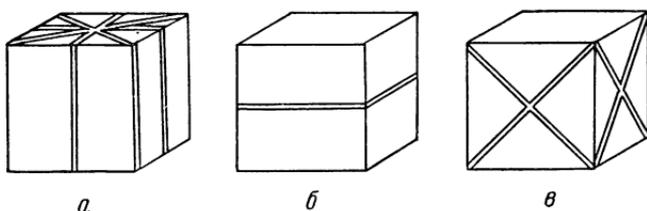


Рис. 10. Плоскости симметрии куба. Куб обладает девятью плоскостями симметрии: четырьмя вертикальными (а), одной горизонтальной (б) и четырьмя наклонными (в).

нако при этом на место одних частей фигуры приходят другие, равные им части.

Симметрическими преобразованиями могут быть повороты вокруг осей симметрии, отражения в плоскостях симметрии, отражения в центре инверсии, как в зеркальной точке.

Так, повернув куб (рис. 9, а) вокруг одной из его четверных осей (например, вокруг вертикальной оси) на 90° , мы увидим, что на место передней квадратной грани перейдет левая или правая такая же грань. При этом весь куб «совместится сам с собой», т. е. займет в пространстве то же положение, которое он занимал и до поворота. Следовательно, поворот куба на 90° вокруг одной из его четверных осей является симметрическим преобразованием.

Другим примером такого преобразования является отражение того же куба в одной из его плоскостей симметрии.

Возьмем горизонтальную плоскость симметрии в кубе, изображенную на рис. 10, б. Отразив в ней, как в зеркале, верхнюю половину куба, мы переместим ее на место нижней его половины. Нижняя же половина куба, отразившись в той же плоскости, перейдет на место верхней его половины. В результате этого куб «совместится сам с собой».

Следует иметь в виду, что отнюдь не любые совокупности элементов симметрии возможны. В этом отношении имеется ряд геометрических ограничений. Кроме того, в связи с решетчатым строением кристаллов, ряд осей симметрии, наблюдающихся в геометрических фигурах, не может появиться в кристаллических многогранниках. Для последних возможны лишь двойные, тройные, четверные и шестерные оси симметрии. Ось пятого порядка, встречающаяся в природе на некоторых цветах и морских звездах, немыслима для решетчатых систем, а в связи с этим не наблюдается и на кристаллических многогранниках. Поэтому вывод совокупностей элементов симметрии, возможных для кристаллических многогранников, составляет лишь часть общего вывода всех возможных совокупностей элементов симметрии для любых конечных геометрических фигур. Оказывается, что в случае кристаллических многогранников мы имеем лишь тридцать две совокупности элементов симметрии, — тридцать два вида симметрии, — тогда как для геометрических фигур их существует бесконечное, хотя и закономерно ограниченное множество. Один из видов симметрии соответствует симметрии куба ($3 L_4, 4 L_3, 6 L_2, 9 P, C$), другой — симметрии кирпича ($3 L_2, 3 P, C$).

Тридцать два вида симметрии группируются по семи кристаллографическим системам (сингониям). Триклинная сингония характеризуется отсутствием осей и плоскостей симметрии. В моноклинной двойная ось и плоскость симметрии присутствуют в единственном числе. В ромбической сингонии имеется несколько двойных осей или несколько плоскостей симметрии. Тригональная характеризуется наличием одной тройной оси, тетрагональная — одной четверной оси, гексагональная — одной шестерной оси. В кубической сингонии мы имеем несколько осей порядка выше двух (например, четыре тройные оси). Знание симметрии кристаллов представляет огромную практическую важность. Так, например, кристалличе-

ские пластинки, употребляющиеся для радиотехнических целей, для подводного телеграфа, для измерения глубины морей и пр., вырезаются из кристаллов, не обладающих центром инверсии. Расположение элементов симметрии в кристалле указывает, каким образом следует вырезать такую пластинку.

Вывод совокупностей элементов симметрии для конечных фигур имел свою длительную и сложную историю, которая сводится к следующему.

В 1830 г. марбургский профессор И. Ф. Гессель исчерпывающим образом, хотя и в весьма труднодоступной форме, разработал теорию симметрии для конечных фигур вообще и в частности — для кристаллических многогранников. Сочинения этого ученого остались совершенно незамеченными.

Позднее француз Браве, не знавший о труде Гесселя, дал в своем исследовании «О многогранниках симметричной формы» (1849 г.) самостоятельный вывод законов симметрии для конечных фигур. Однако он не нашел исчерпывающего определения для симметрии и ограничился лишь перечнем отдельных, известных ему элементов симметрии: центра инверсии, осей и плоскостей симметрии. В наборе перечисленных им элементов симметрии отсутствуют оси сложной симметрии (зеркально-поворотные, или инверсионные, оси). Последнее не могло не отразиться на результатах его вывода. Вместо известных нам 32 кристаллографических видов симметрии Браве вывел лишь 31. По этому поводу Федоров писал: «Современник Гесселя Браве настолько не имел представления о его труде, что сделал заведомый шаг назад . . . , так как не мог даже сделать ясного вывода видов симметрии кристаллов».¹⁸

В 1867 г. уже знакомый нам профессор Артиллерийского училища академик А. В. Гадолин открыл новый оригинальный вывод геометрических законов симметрии для конечных кристаллических тел.

«Вывод всех кристаллографических систем и их подразделений из одного общего начала» А. В. Гадолина отличается исключительным изяществом и ясностью изложения. В этом труде, написанном, кстати сказать, совершенно независимо от предшественников, А. В. Га-

¹⁸ Е. С. Федоров. Кристаллография за сорок лет, стр. 371.

долин ограничился лишь кристаллическими многогранниками, а не любыми конечными геометрическими фигурами. Тем самым его труд оказался широкодоступным для кристаллографов и минералогов. Последнее и привело ко всеобщему принятию и признанию его вывода. Замечательная работа русского академика с течением времени завоевала себе всемирное признание и составила эпоху в развитии кристаллографии и минералогии.

После Гадолина в кристаллографии раз и навсегда было установлено наличие 32 видов симметрии.

В третьем отделе своих «Начал» Евграф Степанович, не удовлетворяясь выводами одних лишь 32 кристаллографических видов симметрии, ставит перед собой задачу полного вывода совокупностей элементов симметрии для всех без исключения геометрических конечных фигур и блестяще ее разрешает.

При этом Федоров идет совершенно оригинальным путем, выводя все возможные системы осей из рассмотрения описанных им же во втором отделе книги «подтипических изогонов» (см. выше). Позже, в 1889 г., Федоров снова вернулся к этому вопросу, выразив в статье «Симметрия конечных фигур» виды симметрии посредством специальных алгебраических выражений.

Долгое время Евграф Степанович, не зная о трудах Гесселя, считал свой вывод первым по времени. Он и на самом деле опередил знаменитого П. Кюри, пришедшего к аналогичным результатам в 1884 г. Однако вследствие задержки с печатанием федоровских «Начал» работа Кюри увидела свет на год раньше. Федоров в своих статьях и особенно в письмах к ученым коллегам неоднократно указывал на это несчастное обстоятельство, отстаивая свой приоритет. Впоследствии, в 1892 г., узнав о существовании работы Гесселя, он написал специальную статью, в которой воздавал должное забытому ученому.

Исключительный интерес с точки зрения развития современной теории структуры кристаллов представляет четвертый отдел «Начал учения о фигурах». Недаром некоторые ученые считают, что именно этим отделом федоровской книги начинается зарождение новой эпохи в истории науки о кристаллах. Для нас отдел этот интересен еще и потому, что он представляет собой первоначальную основу того величественного научного здания теоретической кристаллографии, которое воздвиг Ев-

граф Степанович, задавшись чисто геометрической задачей «выполнения плоскости и пространства».

Чего же на самом деле достиг Федоров, какой вклад внес он в науку? Начнем с заполнения плоскости.

Рассматривая относящиеся сюда задачи, Евграф Степанович дал исчерпывающий вывод таких плоских фигур, которые, будучи равными, параллельно ориентированными и смежными по целым сторонам, полностью (без остатка) покрывают плоскость.

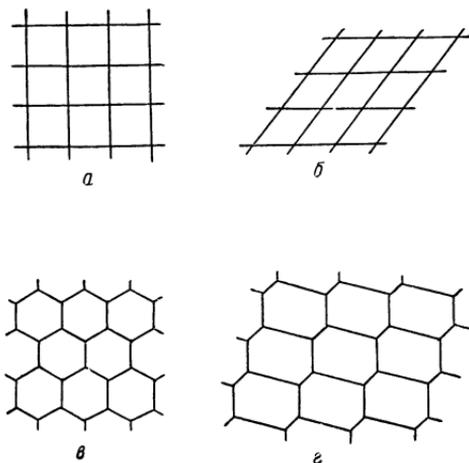


Рис. 11. Параллелононы.

а и б — дипараллелононы, в и г — трипараллелононы.

Фигуры эти Федоров назвал «параллелононами» (т. е. параллельноугольниками). Оказывается, что существует лишь два типа параллелононов. К первому из них принадлежат все многоугольники с двумя парами взаимно параллельных и равных сторон, т. е. параллелограммы, — Евграф Степанович назвал их «дипараллелононами».

Наиболее симметричным дипараллелононом является квадрат; вспомним при этом обычный паркетный узор, где плоскость пола полностью покрывается одинаковыми квадратами (рис. 11, а). Все остальные дипараллелононы могут быть получены из квадрата путем растяжений и сдвигов.

Легко сообразить, что, растягивая квадрат вдоль одной пары его сторон, мы получим прямоугольник, а растягивая тот же квадрат вдоль одной из его диагоналей, перейдем к ромбу.

Путем сдвигов мы можем из прямоугольников получить любые косоугольные параллелограммы. Из рис. 11, б видно, что такие дипараллелогоны также полностью покрывают плоскость.

Вторым типом параллелогонов являются многоугольники с тремя парами взаимно параллельных и равных сторон, т. е. особые шестиугольники. Федоров назвал их «трипараллелогонами». Наиболее симметричным трипараллелогоном является правильный шестиугольник (напомним снова характерный паркетный узор, сплошь состоящий из одинаковых правильных шестиугольников, покрывающих всю плоскость пола, рис. 11, в). Остальные трипараллелогоны выводятся из него с помощью растяжений и сдвигов. Из рис. 11, г видно, что любая система, состоящая из таких одинаковых шестиугольников, также целиком покрывает плоскость.

Не ограничиваясь разрешением задачи, касающейся выполнения плоскости, Федоров блестяще разрешил вопрос и о заполнении пространства.

Впервые задался он целью вывести до конца все многогранники, которые, будучи равными, параллельно расположенными и смежными по целым граням, заполняли бы пространство без остатка. Такие многогранники он назвал «параллелоэдрами» (параллельногранниками). К первому типу параллелоэдров относятся куб и другие параллелепипеды. Все эти многогранники обладают тремя парами взаимно параллельных и равных граней. Поэтому Федоров назвал их «трипараллелоэдрами».

Наиболее симметричным трипараллелоэдром является куб (рис. 12, а). Все остальные трипараллелоэдры можно вывести из куба путем однородных деформаций — растяжений и сдвигов (рис. 12, б). Так, например, растянув куб вдоль одной из его четверных осей, а затем сплющив его вдоль другой четверной оси, мы получим кирпичик. Ко второму типу параллелоэдров принадлежит ряд многогранников, обладающих четырьмя парами взаимно параллельных и равных граней. Это так называемые «тетрапараллелоэдры».

Наиболее симметричный тетрапараллелоэдр опять-таки хорошо знаком читателю. По форме он напоминает обычные торцы на мостовой (рис. 12, *в*). Это правильные шестигранные (гексагональные) призмы. Легко понять, что кладка из торцов может без остатка заполнить пространство. Растягивая или сплющивая многогранник в форме торца по различным направлениям, мы выведем из него множество других, менее симметричных тетрапараллело-

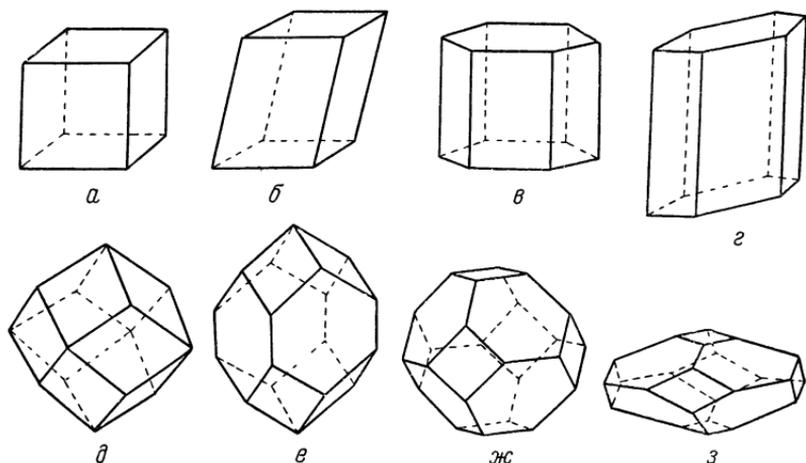


Рис. 12. Параллелоэдры.

а и *б* — трипараллелоэдры, *в* и *г* — тетрапараллелоэдры, *д* и *е* — гексапараллелоэдры, *ж* и *з* — гептапараллелоэдры.

эдров (рис. 12, *г*). Кристаллы в форме тетрапараллелоэдров хорошо известны в природе. Таковы, например, шестигранные призмы берилла и его красивых разновидностей — зеленого изумруда, голубого аквамарина и розового воробьевита.

К третьему типу параллелоэдров относятся особые двенадцатигранники с шестью парами взаимно параллельных и равных граней. Это — «гексапараллелоэдры» («гекса» — по-гречески шесть). Наиболее симметричный гексапараллелоэдр соответствует ромбододекаэдру, т. е. двенадцатиграннику («додока» — по-гречески двенадцать) с гранями в виде ромбов (рис. 12, *д*). Параллельно представлен менее симметричный гексапараллелоэдр, по-

лученный путем деформаций из предыдущего (рис. 12, *е*). Следует отметить, что ромбододекаэдры являются одной из форм, широко распространенных в природе. Кристаллы граната, алмаза, цинковой обманки часто образуют ромбододекаэдрические многогранники. Форма пчелиных ячеек соответствует сильно вытянутому ромбододекаэдру.

Четвертому и последнему типу параллелоэдров отвечают четырнадцатигранники, обладающие семью парами взаимно параллельных и равных граней, «гептапараллелоэдры» («гепта» — по-гречески семь). На рисунке изображен наиболее симметричный параллелоэдр этого типа — кубооктаэдр (рис. 12, *ж*), а также гептапараллелоэдр, полученный путем деформаций из предыдущего (рис. 12, *з*). Итак, в результате своего исследования Федоров получил всего четыре типа параллелоэдров.

Каким образом чисто геометрическая задача о заполнении пространства параллелоэдрами связана с развитой впоследствии теорией Федорова о кристаллическом строении?

Схематически структура кристаллов представляется как бесконечное множество элементарных частиц, расположенных на равных расстояниях друг от друга по параллельным направлениям и в общем случае — на неравных расстояниях по различным направлениям. Совокупность таких частиц образует, как мы уже знаем, пространственную решетку. Задавшись целью более детально изучить различные типы кристаллических решеток, Федоров рассматривал элементарные частицы, слагающие решетку, вместе с окружающим их пространством. Если разделить пространство поровну между такими частицами, то на каждую из них придется свой пространственный участок, принадлежащий только данной частице; при этом каждая частица оказывается как бы заключенной внутри футляра, вырезанного из окружающего пространства. При наличии одинаковых частиц все такие футляры должны быть также совершенно одинаковыми: они равны и параллельны друг другу и разделяют пространство на равные участки. Ясно, что формы упомянутых футляров отвечают параллелоэдрам.

Таким образом, для того чтобы вывести различные типы решеток, нужно разделить пространство на равные ячейки, соответствующие параллелоэдрам, и в центр каждой из них поместить элементарную частичку. За-

полним мысленно пространство равными кубиками и поместим элементарные частицы в их центры, а затем отбросим взятые нами кубы, играющие лишь вспомогательную роль, и посмотрим, какую решетку образуют помещенные в их центрах элементарные частицы. Легко сообразить, что в этом случае мы получим решетку, построенную из частиц, лежащих в вершинах кубических ячеек.

В самом деле, возьмем четыре одинаковых кубика и поместим их на стол так, чтобы они вплотную прилегали

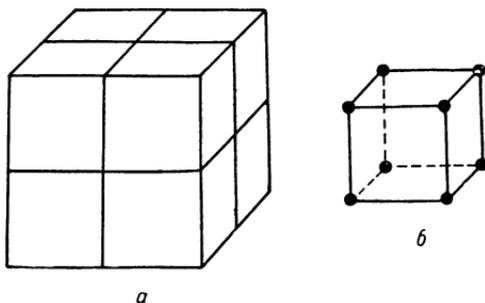


Рис. 13. Выполнение пространства трипараллелоэдрами (а) и соответствующая простая (гексаэдрическая) решетка (б).

друг к другу. Сверху положим на них подобным же образом еще четыре таких же кубика (рис. 13, а). В результате получим большой куб, состоящий из восьми взятых нами кубиков. Мысленно отметим центры этих кубиков и попробуем представить себе их пространственное расположение. На рис. 13, б показано, что упомянутые центры являются вершинами кубической ячейки. Приложив к взятым восьми кубикам спереди, сзади, по бокам и сверху такие же кубики и выделив их центры, получим пространственную решетку, состоящую из кубических ячеек. Это так называемая простая кубическая решетка.

Наиболее симметричные тетрапараллелоэдры заполняют пространство наподобие торцов (рис. 14, а). Элементарные частицы, совмещенные с центрами таких многогранников, располагаются по вершинам шестигранных призм и в центрах их оснований (рис. 14, б).

В результате получаем так называемую гексагональную решетку. Разделив пространство на равные гексапараллелоэдры и совместив с их центрами элементарные

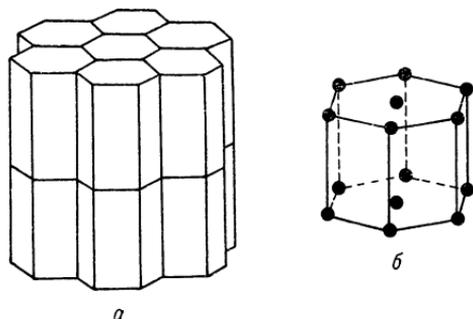


Рис. 14. Выполнение пространства тетрапараллелоэдрами (а) и соответственная гексагональная (призматическая) решетка (б).

частицы, снова получим решетку, состоящую из кубических ячеек. Однако частицы здесь располагаются не только по вершинам ячеек, но и в серединах их граней

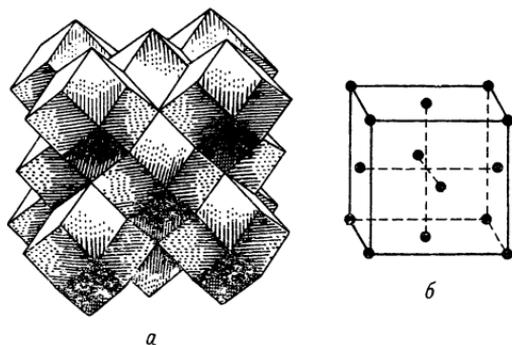


Рис. 15. Выполнение пространства гексапараллелоэдрами (а) и соответственная центрогранная (додекаэдрическая) решетка (б).

(рис. 15). При этом они образуют так называемую кубическую центрогранную решетку. Центры наиболее симметричных и равных гептапараллелоэдров, заполняю-

щих пространство, опять-таки располагаются по вершинам кубических ячеек, а кроме того, в центрах самих ячеек (рис. 16). В результате получаем центрированную кубическую решетку.

Итак, заполняя пространство наиболее симметричными параллелоэдрами, приходим к четырем решеткам — кубической, центрогранной, центрированной и гексагональной. Первые три имеют ячейки в виде кубов, четвертая резко отличается от первых по своей форме. Все остальные

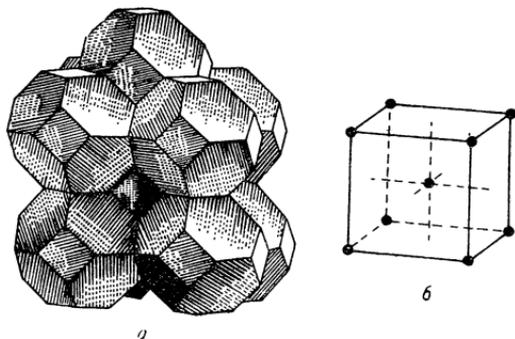


Рис. 16. Выполнение пространства гептапараллелоэдрами (а) и соответственная центрированная (октаэдрическая) решетка (б).

решетки, соответствующие менее симметричным параллелоэдрам, выводятся из разобранных нами четырех идеальных решеток путем их однородных деформаций — растяжений и сдвигов.

Таким образом, кристаллы по форме своих решеток резко подразделяются на два вида. Первая группа приближается по форме ячеек к кубическим решеткам, вторая — к гексагональным. Вывод этот, сделанный Федоровым позднее, является одним из важнейших законов кристаллографии. Он носит название «закона кристаллографических пределов», или «закона Федорова».

Мы нарочно остановились подробнее на вопросе о заполнении пространства, для того чтобы показать, как от чисто геометрических задач молодой ученый перешел к глубочайшим вопросам теоретической кристаллографии. Учение о параллелоэдрах явилось основой для построения федоровской теории строения кристаллов. Однако

следует заметить, что с течением времени эта теория претерпела существенную эволюцию.

В своих ранних работах Федоров писал, что параллелоэдры («кристаллические частицы») прикладываются друг к другу, «как подлинные строительные кирпичики кристаллического вещества». С помощью параллелоэдров им объяснялась, например, спайность — способность кристаллов колотиться по определенным плоскостям. «Все параллелоэдры одной части кристалла, — писал он, — должны отделяться по одному и тому же закону от другой его части». В реальных структурах нет таких физически отдельных «кирпичиков». Хотя ради удобства мы и подразделяем кристаллическую структуру на мельчайшие, бесконечно повторяющиеся параллелепипеды, — так называемые «элементарные ячейки», — но никаких реальных «стенок» или «перегородок» между ними не существует. Содержимое элементарных ячеек в виде входящих в них атомов безраздельно слагает кристаллическое вещество, образуя в совокупности бесконечно протяженную кристаллическую структуру.

Таким образом, роль параллелоэдров в современной кристаллографии несколько снизилась. Из реальных «строительных кирпичиков» они превратились в построения, с помощью которых выводятся и описываются различные типы пространственных решеток. Зато, как увидим дальше, параллелоэдры пользуются большим почетом у современных геометров. Вывод их расценивается последними как огромная заслуга Федорова.

Не ограничиваясь описанием параллелоэдров, Евграф Степанович подробно останавливается также на вопросе о разделении параллелоэдров на равные части, в общем случае ориентированных непараллельно. Такие части он называет «стереоэдрами». Соответственные точки стереоэдров составляют так называемые «правильные системы точек». С помощью их Федоров впоследствии вывел свои 230 геометрических законов, по которым могут располагаться элементарные частицы, строящие кристаллические тела. В четвертом же отделе своей книги Евграф Степанович развивает учение о поясах, впоследствии положенное им в основу геометрической (зональной) кристаллографии (поясом многогранника называется сомкнутый ряд граней, пересекающихся по параллельным ребрам фигуры).

Последний, пятый отдел федоровской монографии посвящен многогранникам с вогнутыми углами. Такие кристаллические фигуры привлекают сейчас особое внимание кристаллографов.

Заканчивая обзор первой книги ученого, нельзя не подчеркнуть еще раз исключительное богатство и разнообразие полученных им результатов. Кроме того, важно отметить, что результаты эти достигнуты не только в отвлеченной области чистой геометрии. Они имеют огромное практическое значение для кристаллографии. Геометрические изыскания Федорова натолкнули его на новый путь, идя по которому он обессмертил свое имя в развитии науки о кристаллах.

В настоящее время «Начала учения о фигурах» пользуются славой классического произведения.

В 1936 г. известный швейцарский кристаллограф В. Новаки в статье «50 лет общей теории структуры кристаллов» рассматривал появление Федоровской книги как дату рождения современной структурной кристаллографии. По поводу федоровского вывода параллелоэдров советский геометр, чл.-корр. АН СССР Б. Н. Делоне пишет: «Традиция приписывает Платону открытие пяти правильных выпуклых многогранников, Архимеду — 13 выпуклых полуправильных многогранников, Кеплеру и Пуансо — четырех правильных невыпуклых многогранников, а Федоров нашел пять параллелоэдров. Во втором издании Большой советской энциклопедии имеются прекрасные таблицы важнейших многогранников — тел Платона, Архимеда, Кеплера и тел Федорова».¹⁹

В 1953 г. «Начала учения о фигурах» были переизданы Академией наук СССР в серии «Классики науки». В этом издании проф. В. А. Франк-Каменецкий дал обстоятельный анализ «Начал», заканчивающийся следующей справедливой характеристикой: «Таким образом, мы можем с полным основанием сказать, что два основных отдела современной кристаллографии, имеющих дело с кристаллическим многогранником (макрокристаллография) и атомным строением кристаллов (микроструктурная кристаллография), опираются на основы, которые разработаны во второй половине прошлого века нашим выдающимся соотечественником — крупнейшим кристаллографом Евграфом Сте-

¹⁹ Б. Н. Делоне. Е. С. Федоров как геометр, стр. 12.

пановичем Федоровым и впервые отражены им в „Началах учения о фигурах“.²⁰

Как далек путь от первых выступлений молодого ученого в Минералогическом обществе, от пережитых им обид и огорчений, от встретившего его непонимания и непризнания до выхода в свет этого нарядного тома в красивом переплете с тисненым портретом автора — всемирно признанного классика науки!



²⁰ В. А. Франк-Каменецкий. «Начала учения о фигурах» Е. С. Федорова и их значение для кристаллографии. В кн.: Е. С. Федоров. Начала, стр. 390.

СЕВЕРНЫЙ УРАЛ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ

Сурово встретила жизнь окончившего институт молодого ученого. Лишь временно поручали ему вести практические занятия при музее Горного института. За скудную оплату переводил он статьи и писал обзоры для технических журналов и газет.

Между тем семья увеличивалась. Вслед за первенцем-сыном появились на свет две девочки. Надо было думать о более серьезной зарплате. И вот Евграф Степанович вынужден был принять предложение Горного департамента и отправиться в качестве геолога в экспедицию по исследованию Северного Урала. Со стесненным сердцем согласился он на это. Ведь длительные поездки надолго отрывали его от любимой работы по кристаллографии. Только нужда заставила ученого временно изменить своему пути и взяться за геологические изыскания. Однако и здесь исключительные дарования и трудоспособность привели молодого инженера к незаурядным результатам. Е. С. Федоров исследовал огромную территорию от $60^{\circ}40'$ (севернее Ивделя) до $64^{\circ}30'$ с. ш. Изученная им область включала водораздельный хребет, восточный склон Урала, большую часть Западно-Сибирской низменности в бассейне р. Большая Сосьва и значительную часть западного склона в верховьях р. Вишеры и Печоры и бассейнах притоков р. Печоры — Щугора и Подчеремы.

Геологические и разведочные работы на Северном Урале проводились в течение шести лет. Каждая поездка продолжалась пять месяцев. За это время часть исследованной области площадью около 15 тыс. км² была густо покрыта маршрутами. На основании их Федоров составил геологическую карту в масштабе 5 верст в дюйме. Остальную же площадь, т. е. около 45 тыс. км², исследованную

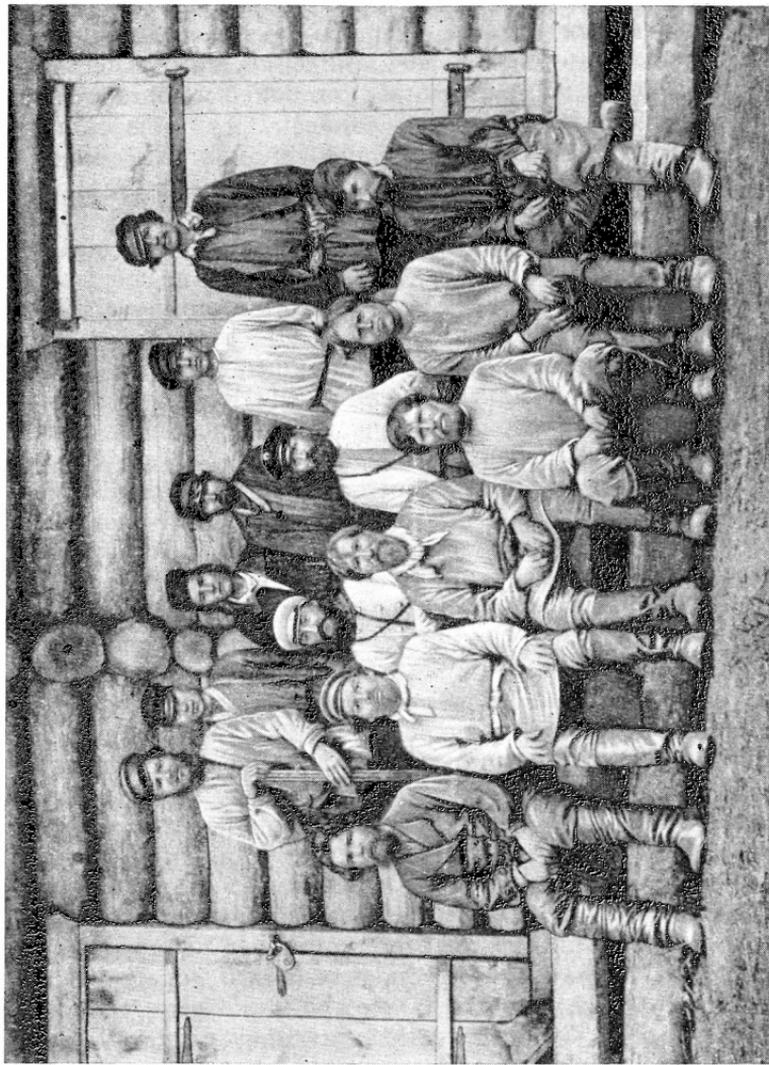
менее детально, он нанес на карту в масштабе 20 верст в дюйме. При этом нельзя забывать тех великих трудностей, которые пришлось преодолеть участникам экспедиции при исследовании этого пустынного и неприветливого края. Полное отсутствие дорог, за исключением оленьих троп, резкая смена жары и холода, тучи мошкары и комаров, скудное питание, состоявшее главным образом из сухарей и грибов, — со всем этим пришлось познакомиться молодому геологу и его спутникам.

В обширной статье Федорова «Сведения о Северном Урале» (1886 г.) содержатся интересные данные о том, в каких условиях приходилось ему работать.

«В состав нашей геологической партии, — пишет Евграф Степанович, — кроме нас, входило 6—10 человек рабочих при числе лошадей от двух до семи. Из этого можно видеть, как временами средства не соответствовали цели; каждому ясно, что немислимо на двух вьючных лошадях перевезти вещи и провиант группы людей, для которых отрезаны все сношения с пунктами, где можно было бы получить что-нибудь».¹

О том, какие трудности приходилось преодолевать геологам, красочно свидетельствует следующий отрывок из той же статьи: «Когда мы выбрались в лес, конечно, продвигаясь лишь при помощи топора, прочищавшего каждый шаг нашего пути, то увидели, что мы попали, что называется, из огня да в полымя. Лес оказался стоящим на сплошной гряде громадных камней, и даже под ними мы всегда находили стоячую и текущую воду, притом здесь эти камни с их промежутками покрылись тонким, но сплошным слоем мха. Теперь мы и наши лошади должны были пробираться меж густых деревьев по узкому прочищенному месту, а предательский мох скрывал опасность, находившуюся под ногами; теперь не только лошади, но и люди стали на каждом шагу проваливаться между камнями, и было о чем подумать при виде картины этого нашего движения вперед. . . Когда, наконец, мы выбрались на оголенное место у самого подножия южной сопки Молебного Камня, то увидели перед собой поразительную

¹ Е. С. Федоров и П. П. Иванов. Сведения о Северном Урале. Описание принадлежит Е. С. Федорову, а составление карты П. П. Иванову. Изв. Русск. географ. общ., 1886, т. 22, стр. 258.



Е. С. Федоров (в центре, слева) среди рабочих — участников экспедиции по исследованию Северного Урала (1888 г.).

картину: вся местность, насколько она доступна глазу, покрыта неправильно нагроможденными камнями, каждый из которых может измеряться даже не кубическими саженьями, а десятками кубических саженей. И вот посреди такого хаоса камней нам предстояло продолжить путь. Только благодаря особенному приему передвижения нам удалось выбраться из безысходного положения.

«Нами сделано было распоряжение, чтобы из-под этих громадных глыб вытаскивались более мелкие камни, какие только может поднять человек, и чтобы такими камнями закладывались зияющие промежутки между громадными камнями. Теперь уже, правда, при помощи необычайных усилий рабочих и лишь шаг за шагом, но уже с полным спокойствием, мы могли продолжать наше движение, и уже на другой день выбрались на знакомый и давно желанный путь, каким представляется гребень Северного Урала вообще».²

Ярко описывается в статье и то, как донимали работников экспедиции комары и мошкара. «Приходится упомянуть о мучителях рода человеческого — комарах. Известно, что всякое страдание заглушается энергической работой; комар же — истинное и непрерывное страдание для путешественников по Северному Уралу. Жалобы на это ничтожное с виду существо вызываются почти у всех исследователей, и нам приходится констатировать тот факт, что только выступив на работу и сосредоточив внимание на обстоятельствах, с нею связанных, чувствуешь некоторое облегчение. Бездеятельность здесь весьма мучительна, невольная же бездеятельность есть истинное наказание. „Подобно тому, как красная нить проходит по всем английским снастям, — повторим мы слова знаменитого уральского исследователя Гофмана, — комары распространены по всему Уралу, и даже на тундре их страшное множество. Вообще насекомые, дикие и домашние, летающие и ползающие, жужжащие и немые, до такой степени нас мучили, что я не могу произносить спокойно и их названий“ — так пишет путешественник Ковальский. . . Странно, что упомянутые путешественники, нередко с таким ужасом вспоминаящие о комаре, так мало уделяют внимания мошке, которой местные жители боятся больше, чем комара. Правда, что мошка свирепствует лишь во

² Там же, стр. 279—280.

вторую половину лета, да притом и в определенную часть дня, а именно к вечеру, но зато докучливость комаров не может сравниться с ужасом нападения тучи мошки, которая, окружив человека, стремится лишить его всех органов чувств».³

С глубоким сочувствием останавливается ученый на полном лишении, мучительно нищенском существовании коренных жителей Северного Урала — вогулов. Им подчеркивается «благородная черта характера вогулов — в высшей степени добросовестное выполнение принятых на себя обязанностей».

Искренним возмущением дышат следующие строки Евграфа Степановича: «Всем известно, что в местностях полудиких инородцев появляются русские эксплуататоры, старающиеся нажиться за счет их неразвитости. . . Ссудив им в долг муки или отпустив лишнюю бутылку водки, такой деятель неограниченно властвует над покорными вогулами, и они готовы выбиваться из последних сил, чтобы отблагодарить обирающего их благодетеля, перед которым они остаются в вечном долгу. . . Главный прием эксплуатации таких людей состоит в том, что, дав вогулу, привезшему ценные шкуры и т. п., немного водки и возбуждая в нем непреодолимую жажду к этому напитку, он, пользуясь этой страстью, под разными предложениями и сохраняя наружный такт и кажущееся достоинство, скупает за бесценок привезенные им вещи».⁴

В одном из писем к Людмиле Васильевне Евграф Степанович описывает интересное происшествие, а вместе с тем и обстановку, в которой ему приходилось работать: «Поднимаясь по Южной Ташемке, кое-как преодолеваю холод. Около 5 часов вечера попадаетесь навстречу какая-то русская женщина. Я весьма удивился, и когда мы проехали дальше, спросил своего проводника-вогула: „Неужели она здесь живет?“. Мне было известно, что на Южной Ташемке проживает только одно вогульское семейство. Он ответил, что женщина, должно быть, заблудилась. Конечно, я скорей вдогонку. Что же оказалось? Она в воскресенье вышла с прииска около Северного рудника и по дороге в Ивдель заблудилась. По ее словам, две недели пришлось ей блуждать по лесам, без

³ Там же, стр. 259—260.

⁴ Там же, стр. 293.

пищи и главное без огня (при ней даже спичек не было). Наконец, она забрела в те дебри, где мы ее и встретили. Вся она осунулась, кожа на лице и руках стала красной и дряблой, взор казался совсем неподвижным. Женщина эта не в состоянии произнести слова, а лишь лепечет про себя едва слышным голосом. Я угостил ее чаем с водкой и небольшим кусочком хлеба, затем посадил в лодку и повез с собой».⁵

А вот портрет самого Е. С. Федорова по возвращении из экспедиции, данный Людмилой Васильевной: «Передо мной стоял какой-то паломник — не то грек, не то болгарин, в потертой одежде, с кудрями по плечам, похуdivший до измождения, черный до неузнаваемости».⁶

Так закончилась шестилетняя эпопея уральских экспедиций, возглавлявшихся Федоровым. Какие же результаты были получены за эти шесть тяжелых лет?

Подводя итоги своих работ на Северном Урале, Евграф Степанович писал: «Участники экспедиции почитали бы себя счастливыми и вполне вознагражденными за те беспрерывные лишения и подчас страдания, которые пришлось перенести при наших исследованиях, если практические результаты, достигнутые нашей второй многолетней экспедицией, сравнятся с теми, что были достигнуты первой уральской экспедицией 30-х годов благодаря самоотверженным трудам Протасова и Стражевского».⁷

Предшественники Е. С. Федорова по исследованию незаселенного Северного Урала М. И. Протасов и Н. И. Стражевский открыли в свое время железорудное месторождение Северного рудника и отметили ряд золотых приисков.

Практические результаты работ Е. С. Федорова выявились только в советскую эпоху. Открытые им месторождения высококачественных бурых углей, марганцевых и железных руд тщательно изучаются и разрабатываются в наше время.

Интересно отметить, что в самой методике геологических работ ярко проявился математический ум Евграфа Степановича. Им был предложен специальный метод

⁵ Л. В. Федорова. Наши будни, горести и радости. Воспоминания. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 2, № 47.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

лодочной съемки и разработан простой графический способ определения падения и простираения горных пород. Тщательному описанию пород Федоров отводил одно из центральных мест в своей работе. Этими описаниями он положил начало современному петрографическому изучению Северного Урала.

Однако основное значение уральских исследований ученого заключается в том, что он впервые дал в общем правильную картину геологического строения изученной им обширной территории, основанную на огромном, собранном им самим фактическом материале. Мимо этого не может сейчас пройти ни один советский геолог.⁸

Возвратясь на зимнее время в Петербург, Федоров в 1885 г. поступил в качестве делопроизводителя и исполняющего обязанности консерватора в Геологический комитет. Это учреждение, сыгравшее очень большую роль в развитии отечественной геологии, было основано в начале восьмидесятых годов прошлого столетия. В его состав входили крупнейшие геологи во главе с отцом русской геологии академиком А. П. Карпинским. К сожалению, молодой Федоров не был своевременно оценен сотрудниками и руководителями Комитета. С горечью пишет об этом Евграф Степанович в своих «Автобиографических записках»: «Любопытна ирония судьбы. Каждый геолог в Комитете мог пользоваться нужными ему средствами, а мне, специально выработывавшему новую систему микроскопов, ныне получившую почти всеобщее применение при минералогических и геологических работах, досталось на долю только то, что было забраковано другими (в виде заброшенного и никем не забранного поляризационного микроскопа); ведь я занимал в Геологическом комитете только канцелярскую должность».⁹

Нет надобности говорить, как не подходила ученому эта чиновничья работа. Однако полное игнорирование его научной деятельности вынуждало Евграфа Степановича мириться со своим положением. Лишь один человек, — Федоров с признательностью упоминает его имя

⁸ Б. М. Романов. Роль Е. С. Федорова в истории геологического исследования Урала. Тр. Горно-геолог. инст., вып. 26, Минералог. сб., № 3, Свердловск, 1955, стр. 5—11.

⁹ Е. С. Федоров. И[мператорская] П[етербургская] Академия наук. Автобиографические записки, воспоминания и характеристики. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 1, № 22.

в своих письмах того времени, — крупнейший исследователь горных богатств нашей страны, профессор И. В. Мушкетов с первых же шагов Евграфа Степановича на научном поприще признал его исключительные дарования. И он делал все, чтобы облегчить жизнь начинающего ученого. Мушкетов устроил Федорова на геологические работы по Северному Уралу. По его рекомендации Евграф Степанович в течение некоторого времени вел занятия по минералогии в Институте инженеров путей сообщения и впоследствии стал профессором Московской сельскохозяйственной академии.

Более десяти лет не покидал Федоров Геологического комитета. Занимаемое им здесь скромное место все же давало ему возможность жить зимой в Петербурге и продолжать, хотя бы и урывками, свою научную работу. Именно в этот период одна за другой вышли в свет его самые замечательные работы по кристаллографии, представляющие собой вершину творческой мысли ученого и создавшие новую эпоху в науке. Это серия «Этюды по аналитической кристаллографии», где впервые применяются понятия проективной геометрии по отношению к кристаллам, раскрывшие смысл некоторых, казавшихся до тех пор неясными кристаллографических закономерностей. Далее следует ряд работ по симметрии, завершившихся знаменитым трудом «Симметрия правильных систем фигур» (1891 г.). В нем Федоров впервые дает вывод особых геометрических законов, характеризующих кристаллические структуры. Упомянутые законы отвечают двумстам тридцати различным способам, по которым могут располагаться элементарные частицы в кристаллах.

Исключительное значение этого гениального труда выяснилось лишь 20 с лишним лет спустя, когда внутреннее строение кристаллов стало расшифровываться с помощью рентгеновских лучей. Рентгеноанализ доказал, что законы, открытые Федоровым, лежат в основе всех реальных кристаллических структур.

Годом позже немецкий математик А. Шенфлис дал свой вывод двухсот тридцати групп симметрии. Однако он принужден был признать приоритет Федорова в этом вопросе, а вместе с тем указать и на свои прежние ошибки, исправленные по указаниям русского ученого.

В 1890 и 1892 гг. Евграф Степанович дважды представлял свои основные труды по теории строения кристал-

лов на соискание премий, присуждавшихся Академией наук. При этом он надеялся привлечь внимание ученого мира к своим исследованиям для того, чтобы получить возможность полностью отдаться научным занятиям. Однако в длинном официальном списке работ, представленных в Академию, труды его не удостоились даже упоминания. «Какие академические авторитеты по кристаллографии (сделавшие, конечно, в теории структуры кристаллов гораздо больше, чем автор представленного сочинения, иначе они не были бы авторитетами, имеющими право судить, а тем более уничтожать всякое значение сочинения) продиктовали Академии заключение, которому она подчинилась, остается неизвестным»,¹⁰ — писал с горькой иронией Федоров.

В истории науки широко известны случаи, когда замечательные открытия долгое время оставались непонятыми и непризнанными, а нередко встречали и отрицательное, даже резко враждебное отношение.

Сейчас, когда мы вспоминаем о величайшем достижении Е. С. Федорова — выводе 230 пространственных групп, — небезынтересно восстановить факты, показывающие, до какой степени этот вывод опередил свое время и как он был чужд даже крупным представителям науки той эпохи.

В Архиве Академии наук СССР (Ленинградское отделение) сохранились материалы, раскрывающие историю забаллотирования трудов Е. С. Федорова. Из этих документов видно, что рецензирование федоровских работ было поручено чл.-корр. Академии К. А. Андрееву (1848—1921).⁵

Профессор сперва Харьковского, а затем Московского университетов, учредитель Харьковского математического общества, К. А. Андреев считается одним из крупных отечественных геометров.

Сохранившийся отзыв этого ученого показывает, что рассматривая работы Е. С. Федорова, Андреев как чистый математик, далеко стоящий от естествознания, недоучел и не понял их огромного значения для кристаллографии (следует иметь в виду, что до открытия рентгенострук-

¹⁰ Е. С. Федоров. Первое констатирование опытным путем асимметричной правильной системы. Зап. Горн. инст., 1914, т. V, стр. 56.

турного анализа значение федоровского вывода не было понятно и большинству натуралистов).

Для того чтобы проиллюстрировать сказанное, остановимся несколько подробнее на самом тексте отзыва.

Свою рецензию К. А. Андреев начинает с разбора первой книги Федорова — «Начала учения о фигурах» (1885 г.), справедливо расценивая ее как «корень, на котором выросли последующие сочинения». «В ней мы видим самое ценное из произведений г. Федорова», — пишет рецензент. Он подчеркивает «систематичность изложения, многосторонность воззрений и разнообразие затронутых в этой книге вопросов». Особое внимание Андреева привлék четвертый отдел книги, посвященный «чрезвычайно важному как для геометрии, так и для естествознания вопросу» — о выполнении плоскости и пространства.

Недостатком федоровской книги рецензент считает слишком большую ее объемистость. «Автор наполняет свою книгу множеством определений, следствий и теорем»,¹¹ — пишет он.

Как видим, оценка К. А. Андреевым «Начал учения о фигурах» является в общем благожелательной, хотя она далеко не отражает всего значения этого сочинения — «одного из самых замечательных геометрических творений», по характеристике Б. Н. Делоне.

Переходя к разбору двух сочинений Федорова, представленных на соискание премии, К. А. Андреев дает им значительно более низкую оценку. Он пишет: «Признавая его („Начала учения о фигурах“, — *И. Ш.*) за корень, на котором выросли последующие сочинения, нельзя не пожалеть, что сила произрастания не находится в достаточном соответствии с силой корня».

В рецензируемых сочинениях К. А. Андреев прежде всего отмечает особенный метод исследования, принадлежащий всецело автору и называемый им «анализом симметрии» (употребление особого рода системы координат, состоящей из какого угодно числа осей, проходящих через одну точку).

По мнению рецензента, прием Федорова является «лишь опорой для воображения и памяти, в том же самом

¹¹ Отзыв проф. К. А. Андреева о трудах Е. С. Федорова «Симметрия конечных фигур», «Симметрия правильных систем фигур». Архив АН СССР, Л., ф. 2, оп. 1, 1891, № 1, лл. 61—65.

смысле, как чертеж, как символическая схема, но самого существенного для того, чтобы быть аналитическим методом, в нем нет». ¹²

Далее следует очень краткий разбор сочинения «Симметрия правильных систем фигур». Этот бессмертный труд К. А. Андреев характеризует как «обширный, занимающий большую часть книги, последовательный, но утомительно однообразный вывод 230 правильных систем фигур». По его мнению, Е. С. Федоров лишь стремится «к проверке заключений» Шенфлиса, а не вносит чего-либо нового в науку. «Главный положительный результат исследования состоит в обнаружении двух видов правильных систем фигур, не замеченных прежними исследователями симметрии», — резюмирует он.

Очень любопытна концовка отзыва, которую мы приводим целиком: «В общем мы не отрицаем значения сочинений г. Федорова как произведений математических, и из предыдущего видно, что мы отдаем в этом отношении предпочтение его „Началам учения о фигурах“. Эта книга полна любопытных вопросов, содержит строгие суждения и разъяснения и способна возбудить интерес к изучению геометрических форм и к самостоятельным изысканиям. Но дальше этого мы не можем идти. Усовершенствования аналитической геометрии и анализ симметрии, употребляемый в двух последних сочинениях г. Федорова, суть, по нашему мнению, результаты некоторой его математической неопытности и значительно понижают цену этих его произведений». ¹³

Так судил о произведениях Е. С. Федорова крупный специалист-математик около семидесяти лет тому назад. Важно подчеркнуть, что это суждение относилось к тому именно сочинению великого кристаллографа, сущность которого современный представитель геометрии Б. Н. Делоне характеризует следующим образом: «Общий математический закон структуры один, и его нашел Федоров. К открытию этого закона в течение века были близки многие выдающиеся ученые, но они выводили только его частные случаи или некоторые следствия из него, самый же закон окончательно был найден Федоровым». ¹⁴

¹² Там же.

¹³ Там же.

¹⁴ Б. Н. Делоне. Е. С. Федоров как геометр. Тр. Инст. истории естествознания и техники АН СССР, т. 10, 1956, стр. 5.

Чем же объясняется недооценка и непонимание замечательных федоровских открытий К. А. Андреевым?

Труды Е. С. Федорова, о которых судил К. А. Андреев, принадлежат не столько математике, сколько кристаллографии. Судить о трудах Федорова могли только ученые, разрабатывающие теорию кристаллической структуры и хорошо знающие конкретный кристаллографический материал. А таких ученых не только в России, но и во всем мире тогда еще не было.

Евграф Степанович очень тяжело переживал свою неудачу. Не улучшили его положения и два замечательных изобретения в области угловых измерений и оптического исследования кристаллов. Первым из них был специальный прибор, позволяющий устанавливать пространственное взаимное расположение граней кристалла. Прибор этот — двукружный теодолитный гониометр. Второе изобретение представляет собой столик, накладываемый на обычный столик микроскопа и предназначенный для кристаллооптических исследований. В настоящее время прибор этот широко известен под названием «универсального федоровского столика».

Позднее неоднократно указывалось, что изобретение одного лишь федоровского столика делает имя его создателя бессмертным. Однако выступление Евграфа Степановича в Геологическом комитете с предложением осуществить постройку универсального столика для оптического исследования минералов и горных пород не оказало желанного действия. Сохранился даже рассказ о том, как профессор Еремеев сразу же после ознакомления с изобретениями своего ученика перевел разговор на другую тему.

Классическая монография Федорова «Теодолитный метод в минералогии и петрографии», описывающая приемы работы с теодолитным гониометром и универсальным столиком, увидела свет только в 1893 г.

В «Кратком руководстве по кристаллографии», изданном в 1891 г., содержится общедоступное изложение основных выводов Федорова. Небольшая книга произвела глубокое впечатление на специалистов. «Ваш учебник является для нас, натуралистов, учебником будущего»,¹⁵ — писал Евграфу Степановичу профессор мине-

¹⁵ Л. В. Федорова. Воспоминания.

ралогии Новороссийского университета Р. А. Прендель. У Федорова начали появляться ученики и последователи.

Усиленно изучал федоровские труды профессор Варшавского университета, впоследствии занявший ведущее место в кристаллографии, Юрий Викторович Вульф (1863—1925). В Петербургском университете федоровские достижения пропагандировал талантливый, рано умерший минералог, занимавшийся сложными вопросами кристаллизации, А. Н. Карножицкий (1867—1907).

Однако все попытки Федорова занять место на кафедре, найти возможность передать свои знания молодежи окончились полной неудачей. В «Воспоминаниях» Людмилы Васильевны рассказывается о том, как Евграф Степанович решил обратиться в Петербургский университет с предложением безвозмездно читать дополнительные лекции по кристаллографии. Университетский профессор, к которому он пришел посоветоваться по этому поводу, не нашел ничего лучшего, как воскликнуть: «Э, батенька! Да вы подбираетесь к нашему казенному пирогу!». Долго вспоминал впоследствии Евграф Степанович этого почтенного профессора. «У них на уме пирог, а не наука!»¹⁶ — с горечью говорил он.

В 1889 г. Федоров принял участие в конкурсе на заведование кафедрой минералогии и геогнозии в Петербургском лесном институте. В качестве пробной лекции им был прочитан блестящий обзор по вопросу о выветривании горных пород. Лекция его конкурента — молодого, ничем не примечательного минералога, сына академика Н. И. Кокшарова, — произвела на всех впечатление ответа плохого ученика на экзамене. Однако кафедру получил все же молодой Кокшаров, а не Федоров.

Несмотря на опубликование ряда выдающихся работ Федорова, имя ученого продолжало оставаться в России малоизвестным. За границей же появилось несколько статей, в которых частично повторялись сделанные им выводы. В связи с этим в 1890 г. Евграф Степанович поместил в «Записках Минералогического общества» специальную «Заметку об успехах теоретической кристаллографии за последнее десятилетие». «Поводом к составлению этого очерка, — пишет он, — послужили многие случаи повторения за границей открытий и выводов,

¹⁶ Там же.

сделанных раньше в России». ¹⁷ К числу таких повторений Федоров относит вывод П. Кюри всех возможных совокупностей элементов симметрии для конечных фигур, дублирующий «Начала учения о фигурах».

Далее Евграф Степанович упоминает Миннигероде, частично повторившего в 1887 г. его вывод, согласно которому символы всех вообще граней (ребер) фигуры какого-нибудь раздела симметрии выводятся из символа одной данной грани (или ребра) посредством перестановок и замещений (1885 г.). Упрощение кристаллографических вычислений с помощью аналитических выражений основного закона кристаллографии, описанное Федоровым в его «Этюдах по аналитической кристаллографии» (1886—1887 гг.), в неполном и несовершенном виде было повторено в работах Хехта (1887—1888 гг.). Данное Евграфом Степановичем понятие о сдвиге и применении его в области кристаллографии («Начала учения о фигурах», «Этюды по аналитической кристаллографии») повторяет Либиш (1888). Статья Гесса о многогранных калейдоскопах, напечатанная в 1888 г., описывает гонюэдрические приборы по кристаллографии, предложенные Федоровым в 1883 г.

Особенное значение придавалось Федоровым вопросу о приоритете в деле создания новой теории кристаллической структуры, с первыми сообщениями о которой он выступил в Минералогическом обществе еще в 1881 г.

Прекрасно сознавая огромное значение сделанных им открытий, Евграф Степанович неоднократно подчеркивает в статье свое первенство в данной области. Разумеется, это делалось им не в личных интересах. Будучи горячим патриотом России, он не мог не болеть душой, видя, как систематически замалчиваются заслуги русских ученых, — интересы отечественной науки были ему дороже всего. В связи с этим Федоров и предпринял публикацию рефератов своих работ на страницах международного кристаллографического журнала «*Zeitschrift für Kristallographie*».

Составление рефератов и заботу по их печатанию взял на себя, по просьбе Евграфа Степановича, Ю. В. Вульф, впоследствии крупнейший русский кристаллограф, изобретатель всемирно известной сетки для кристалло-

¹⁷ Зап. Минералог. общ., 1890, т. XXVI, стр. 345.

графических проекций («сетка Вульфа»), автор основной формулы рентгеноанализа кристаллов — формулы Брэгга—Вульфа. В то время Ю. В. Вульф как начинающий ученый был командирован за границу. Горячий поклонник Федорова, он и принялся пропагандировать его достижения за границей.

Вот что пишет по этому поводу ученик Вульфа, академик А. В. Шубников: «Своеобразной заслугой Юрия Викторовича перед наукой, — которой он гордился, — было то, что он, как он сам выражался, „открыл Федорова“, т. е. сделал его известным за границей, напечатал рефераты работ своего старшего коллеги на немецком языке».¹⁸

В 1890 г. на страницах «Кристаллографического журнала» появилось пять рефератов федоровских работ. Издатель журнала, выдающийся немецкий кристаллограф П. Грот, понял и высоко оценил значение трудов Федорова. Это нашло отражение в его обширной переписке с Евграфом Степановичем.

В 1893 г. Федоров был включен в список кандидатов в действительные члены Академии наук. По этому поводу П. Грот совместно с известным австрийским минералогом Г. Чермаком прислал специальное обращение к президенту Академии, которое заканчивалось следующими словами: «Нижеподписавшиеся не сомневаются в том, что Россия имеет в лице Федорова авторитет на поприще кристаллографии, которому мы завидуем. Мы признаем Федорова за самого подходящего кандидата на кафедру кристаллографии и минералогии в Государственной Академии наук и считали бы его выбор за большое поощрение этим наукам в России».¹⁹ В отзыве П. Грота о трудах Федорова мы также читаем: «Представленные работы относятся, по мнению нижеподписавшегося, к числу самых важных приобретений в области кристаллографических исследований последнего времени».²⁰ Позднее, в 1896 г., по настоянию П. Грота, Евграф Степанович был выбран в члены-корреспонденты Баварской академии.

¹⁸ А. В. Шубников. Юрий Викторович Вульф. Природа, 1926, № 1—2, стб. 5.

¹⁹ Л. В. Федорова. Воспоминания.

²⁰ Зап. Минералог. общ., ч. 30, 1893, стр. 503.

Однако результаты выборов в Российскую Академию наук были самыми неожиданными: Федорова забаллотировали. Зато избранным оказался его старый учитель П. В. Еремеев. Усердный труженик на научном поприще, кропотливый собиратель фактов, но не гениальный творец науки, каким был Федоров, Еремеев, конечно, не мог быть поставлен в один ряд с ним.

Чем же все-таки можно объяснить то, что выбор пал на П. В. Еремеева? Чтобы получить правильный ответ на этот вопрос, следует вспомнить о существовавшей в академических кругах того времени группе ученых, во многом тормозившей развитие русской науки. Эта группа не допустила избрания в Академию Д. И. Менделеева. Она же забаллотировала выдающегося русского физика А. Г. Столетова.

Федоров прекрасно понимал, что он явился жертвой закулисных интриг, не имеющих ничего общего с настоящей наукой. Об этом он с горечью пишет в письме к своей жене: «в Академию я, кажется, провалился, хотя и буду еще некоторое время числиться кандидатом. Оказывается, „немцы“ (академическая партия) снова взяли верх. Еремеев их кандидат. Еще хуже, по-видимому, обошлись со Столетовым, выборы которого я ждал со дня на день. „Немцы“ его совершенно забаллотировали, и он даже не может быть больше выставлен кандидатом. Все это страшные секреты, про которые, впрочем, вероятно, все знают хорошо».²¹

Помимо сказанного, немалую роль в неудаче Федорова, очевидно, сыграл тот факт, что Евграф Степанович никогда не склонял головы перед сильными мира сего. Один из конкурентов Федорова на выборах в Академию прямо и цинично заявлял: «Надену мундир, поклонюсь, кому следует, и стану академиком». Такой путь «проникновения» в Академию для Евграфа Степановича был закрыт.

Все происшедшее тяжело отразилось на ученом. Рухнула надежда на возможность полностью отдаться любимой науке, работать в хорошо устроенной лаборатории, основать свою школу. Крайне стесненное материальное положение сделало невыносимым дальнейшее пребывание в Петербурге, и в 1894 г. Евграф Степанович принял

²¹ Л. В. Федорова. Воспоминания.

предложение заняться детальным геологическим исследованием Богословского горного округа.²²

В мае этого же года Федоров вместе с семьей переехал на Урал. «В результате, — пишет Евграф Степанович, — я (ввиду подрастания детей) дальше не мог уделять своего времени науке (нечем кормить детей) и в 1894 г., ровно к 25-ой годовщине своей научной деятельности, принужден был уехать на Урал на частную службу в качестве практического инженера».²³

²² Северная часть Свердловской области.

²³ Е. С. Федоров. Автобиографические записки.

ЗАКОНЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ АТОМОВ В КРИСТАЛЛАХ

В «Началах учения о фигурах» Федоров дал полный вывод совокупностей элементов симметрии для всех без исключения конечных фигур. После этого он принялся за разработку всеобъемлющего учения о симметрии, которое охватывало бы не только конечные, но и бесконечные системы. Не ограничиваясь чисто геометрической интерпретацией выведенных им совокупностей элементов симметрии, он придал каждой из них аналитическое выражение. Этим важнейшим проблемам посвящен классический цикл его сочинений, который сам автор объединил под общим названием «Начала анализа симметрии».

К этому циклу относятся следующие работы Евграфа Степановича: «Основные формулы аналитической геометрии в улучшенном виде» (1888 г.), «Симметрия конечных фигур» (1888 г.), «Симметрия правильных систем фигур» (1890 г.).

Первый из названных мемуаров, по определению самого Федорова, составляет «азбуку анализа симметрии». Здесь ученый обращает внимание на то, что в общем случае при решении задач, связанных с пространственными образами, не следует ограничиваться лишь тремя координатами, полученными с помощью трех координатных осей, как это делается по Декарту в аналитической геометрии. В общем случае удобнее иметь больше трех необходимых координат, с тем чтобы можно было выбирать из них те, которые приведут к простейшему решению. В связи с этим Евграф Степанович предлагает через постоянную точку в пространстве, отвечающую началу координат, проводить n координатных осей. Для определения координат какой-либо точки через последнюю проводится n плоскостей, перпендикулярных ко всем осям координат. Величины отрезков, отсекаемых этими

плоскостями на осях, и будут координатами данной точки. При помощи специальных уравнений всегда можно перейти от n координат к трем обычным координатам.

Улучшения, предложенные Федоровым, имеют особое значение для кристаллографии.

При помощи такого метода Евграф Степанович дает алгебраические выражения для всех совокупностей элементов симметрии (видов симметрии), характеризующих конечные фигуры. Изложение этого вопроса составляет содержание его работы «Симметрия конечных фигур».

Полностью завершив вывод видов симметрии для конечных фигур и исчерпывающе охарактеризовав их с помощью алгебраических уравнений, ученый переходит затем к осуществлению своей заветной мечты — выводу и характеристике совокупностей элементов симметрии для бесконечных правильных систем фигур.

До него над этими проблемами работал немецкий физик и кристаллограф Л. Зонке (1842—1892). Кристаллические структуры рассматривались им как неограниченно протяженные правильные системы, в которых вокруг каждой материальной точки все остальные располагаются совершенно так же, как и вокруг любой другой материальной точки той же системы. Для того чтобы охарактеризовать подобные системы, Зонке прибегает к следующему приему. Какую-либо точку системы он соединяет со всеми остальными точками с помощью прямых линий (лучей). То же самое делается и со всеми другими точками системы. В результате все точки заменяются пучками лучей.

В связи с одинаковым распределением точек правильной системы вокруг каждой отдельной точки все такие пучки будут одинаковыми между собой. Зонке предположил, что они всегда являются совместно равными. Это значит, что их можно совмещать друг с другом путем наложения. Изучив подобные правильные системы точек, Зонке вывел для них 65 совокупностей элементов симметрии. Это так называемые пространственные группы первого рода.

Однако Зонке не учел того, что равные пучки в правильных системах могут быть двух родов. Пучки первого рода подчиняются его системе. Это совместно равные пучки. С другой стороны, можно себе представить и такие, которые относятся друг к другу как предмет и его зеркальное отражение. Их можно совмещать друг с дру-

гом только с помощью зеркальных отражений. Эти пучки второго рода являются зеркально равными. Федоров впервые обнаружил упущение Зонке и дал окончательное завершение геометрической теории правильных систем фигур, к которым принадлежат в первую очередь кристаллические структуры.

В результате вместо 65 групп Зонке Евграф Степанович вывел 230 пространственных групп, 230 единственно возможных геометрических законов, по которым располагаются элементарные частицы в кристаллических структурах.

Первые указания на ошибку Зонке мы находим уже в первой федоровской книге — «Началах учения о фигурах».

В четвертом отделе, помимо вывода параллелоэдров и стереоэдров, лежащего в основе федоровской теории строения кристаллов, содержится ряд положений, относящихся к правильным системам точек: «Если внутри одного стереоэдра возьмем произвольную точку и затем построим соответственные точки на всех других фигурах, то получим систему точек, называющуюся правильной, то есть такой, что если из какой-нибудь точки проведем лучи ко всем другим точкам системы и потом то же сделаем с другой точкой, то получим две совмещающиеся друг с другом системы лучей. Если мы предположим, что пространство выполняется не только равными, но и симметричными фигурами, то, как мы видели, пара таких смежных фигур составит одну фигуру, из равных которым будет выполняться пространство».¹ В последней фразе четко сформулировано отличие понятия Федорова о правильных системах точек от соответственного понятия Зонке. Это отличие подчеркивается далее самим Федоровым. После доказательства теоремы, согласно которой «каждая правильная система точек есть система соответственных точек стереоэдров», Федоров помещает следующее специальное примечание: «В предыдущем, определение правильной системы точек заимствовано у Зонке. Но с равным правом этот же термин применим и к совокупности двух правильных систем, из которых одна симметрична с другой... Если, для различия,

¹ Е. С. Федоров. Начала учения о фигурах. Изд. АН СССР, М.—Л., 1953 (серия «Классики науки»), стр. 310.

системы точек с плоскостями симметрии мы назовем правильными двойными системами, то увидим, что только что доказанная теорема одинаково применима как к простым, так и к двойным системам».²

В последующие годы Федоров приступил к систематической разработке учения о симметрии, причем завершением этого учения явилась его «Симметрия правильных систем фигур» (1890 г.).

Вот как Евграф Степанович сам передает ее содержание: «Здесь дается полный вывод всех правильных систем точек и намечен вывод возможных видов структур кристаллов. Системы Зонке находятся в числе других систем лишь как особый частный случай и называются простыми системами. Каждая система строго определяется алгебраическими уравнениями».³

В предисловии к своему труду Федоров отмечает: «Это сочинение заканчивает собой ряд чисто математических исследований в области кристаллографии, намеченных мною в начале моего самостоятельного научного поприща».⁴

На этом, казалось бы, заканчивается история федоровского вывода правильных систем фигур. Но на самом деле это не так, — она теснейшим образом переплетается с выводом пространственных групп Шенфлиса. Здесь мы встречаемся с почти одновременным решением одной и той же задачи двумя учеными, работавшими независимо друг от друга. Такие случаи хорошо известны и неоднократно повторялись в истории науки. Напомним хотя бы знаменитый спор о приоритете Ньютона и Лейбница. Однако тщательное изучение работ Федорова и Шенфлиса, а также их обширной переписки с несомненностью доказывает первенство русского ученого в этом вопросе.

Первые две статьи Шенфлиса были опубликованы в 1888 г. Вот что пишет Федоров по этому поводу: «Недавно я познакомился со статьями Шенфлиса, появившимися в Геттингенском ученом журнале. Мне доставило удовольствие видеть повторение всех существенных оснований моей теории кристаллической структуры в этих

² Там же, стр. 312.

³ Е. С. Федоров. Курс кристаллографии. Изд. 2, СПб., 1897, стр. XIV.

⁴ Е. С. Федоров. Симметрия и структура кристаллов. Изд. АН СССР, 1949 (серия «Классики науки»), стр. 116.

работах, хотя и в менее обработанном виде».⁵ Далее Евграф Степанович приводит несколько параллельных цитат из статей Шенфлиса и из «Начал учения о фигурах», отмечая общее сходство результатов и ряд преимуществ в своих выводах. Годом позже Шенфлис публикует статью, содержащую описание 227 пространственных групп.

Федоров в это время уже закончил и представил к печати свой труд «Симметрия правильных систем фигур». Однако и его вывод не дал еще окончательного числа пространственных групп. Появление статьи Шенфлиса побудило русского ученого приложить к протоколу заседания Минералогического общества от 21 ноября 1889 г. предварительную таблицу выведенных им правильных систем фигур в числе 228. Таблицы сопровождаются кратким пояснением, заканчивающимся следующими словами: «По странной случайности почти одновременно с окончанием этой работы получен том XXXIV журнала „Mathematische Annalen“, в котором помещена работа Шенфлиса „О группах преобразований пространства самого в себя“. Здесь выводятся на тех же основаниях все возможные правильные системы точек в числе 227, то есть всего на одну меньше, чем выведено референтом и показано на приложенной таблице. Однако такое согласие носит случайный характер и зависит от того, что Шенфлис почти столько же упустил возможных систем, сколько повторил в выводе системы одинаковые. Неполноту выводов Шенфлиса референт показал на простых примерах».⁶

Отдельные оттиски «Симметрии правильных систем фигур» Федорова увидели свет в 1890 г. Работа эта вошла в состав 28-го тома «Записок Минералогического общества», вышедшего в 1891 г. В таблице, завершающей статью, находим всего 229 правильных систем. Но уже в списке опечаток, помещенном в конце упомянутого тома, на стр. 557—558 приводятся поправки и дается общее число систем, равное 230. Кроме того, те же поправки находятся в протоколе заседания Минералогического общества от

⁵ Е. С. Федоров. Заметка об успехах теоретической кристаллографии за последнее десятилетие. Зап. Минералог. общ., т. 26, 1890, стр. 374—375.

⁶ Е. С. Федоров. Симметрия структуры кристаллов, стр. 593.

13 ноября 1890 г., опубликованном ранее.⁷ Сущность их сводится к выводу двух новых систем — 16h и 103a — и установлению тождества системы, выведенной раньше под № 16h, с системой 17 s. Таким образом, общая сумма всех систем оказалась равной 230.

В 1891 г. была напечатана немецкая книга Шенфлиса «Кристаллические системы и структура кристаллов». Автор ее неоднократно цитирует Федорова, указывая на его первенство в ряде вопросов, касающихся теоретической кристаллографии. Приведем две характерные фразы из этой книги. «Необходимость развивать теорию Зонке так, как этого требует в строгом смысле слова чистая структурная теория, была впервые подчеркнута Е. Федоровым». И далее: «Сочинение Федорова, содержащее полный вывод всех пространственных групп и их отношение к симметрии кристаллов, появилось на русском языке в 1890 г. под заглавием „Симметрия правильных систем фигур“».⁸

В архиве Федоровского института сохранилась обширная переписка Федорова с Шенфлисом.⁹ Даже беглое ознакомление с письмами Шенфлиса показывает, сколь многим был обязан немецкий ученый Евграфу Степановичу.

Еще больший интерес представляют черновики писем Федорова к Шенфлису. Помимо чисто научного значения, они примечательны в качестве характеристики личности гениального кристаллографа. Между прочим, из этих писем видно, как настойчиво отстаивал Федоров приоритет русских ученых в области кристаллографии. Неоднократно говорил он о значении работы А. В. Гадолина, упоминал также и о своем первенстве в решении ряда вопросов.

Конечно, такие указания делались им вовсе не в личных интересах. Горячий патриот, Евграф Степанович энергично боролся за дорогие ему интересы отечественной науки. В этом отношении особенно показательна

⁷ Зап. Минералог. общ., т. 27, 1890, стр. 448—449.

⁸ A. Schoenflies. Krystallsysteme und Krystallstruktur. 1891, стр. 622.

⁹ См. публикацию Г. Б. Бокия и И. И. Шэфрановского «Материалы по истории русской кристаллографии (из архива Е. С. Федорова)». Сб. «Научное наследство», т. 2, Изд. АН СССР, М., 1950.

речь, произнесенная им по поводу появления книги Шенфлиса.

«Милостивые государи! Только что появилось одно замечательное сочинение по теоретической кристаллографии, ясно доказывающее, что последняя уже не только в России, но и в Германии пустила глубокие корни. Я подразумеваю сочинение Шенфлиса „Кристаллические системы и структура кристаллов“, заключающее около 640 страниц.

«Как показывает заглавие этого сочинения, оно рассматривает только 2 вопроса кристаллографии: вопрос о системах симметрии и их подразделениях и вопрос о правильных системах фигур, или, употребляя термин самого автора, о пространственных группах, или, выражаясь иначе и притом общепонятно, о возможных видах структуры кристаллов.

«Если не касаться работ Гесселя, до такой степени опередивших свое время, что они оставались непонятными и потому почти неизвестными даже современникам, то первый вопрос самым точным образом был исследован в России А. В. Гадолиным, второй вопрос — Вашим покорнейшим слугой.

«Таким образом, названное сочинение А. Шенфлиса, знаменующее для Западной Европы громадный шаг вперед, для России такового не представляет.

«Вообще, в этой отрасли науки русская ученая литература значительно опередила литературу всех других стран. Конечно, и в новом сочинении, несмотря на его обширность, не только движение в этой области не опередило русской литературы, но еще многое, заключающееся в последней, остается в нем неизвестным, непонятым. Однако и для нас, русских, сочинение это имеет большое значение как первый шаг ознакомления с русскими сочинениями в подлиннике. Мне кажется, трудно объять все значение этого факта, сколь ни кажется он нормальным, обыденным с общей точки зрения.

«Для того чтобы хоть сколько-нибудь осветить это значение, я беру на себя смелость изложить собранию нижеследующие соображения.

«Мне кажется общеизвестным то особенное отношение иностранных ученых к русским сочинениям, которое признает их как бы несуществующими. Это отрицатель-

ное отношение иностранных ученых иногда доходит до того, что некоторые из них не считают для себя обязательным даже установление новых зоологических видов, хотя бы при этом установлении было исполнено все, что требуется по международным правилам, то есть сделано удовлетворительное изображение и описание, если только описание это составлено по-русски. Мне всегда казалось обидным для национального самолюбия такое подчиненное отношение русской ученой литературы. То, что весьма естественно для Сербии, Голландии, даже Венгрии, весьма неестественно для литературы одной из величайших наций, имеющей громадную будущность.

«Конечно, в настоящее время общепризнанными языками в научной литературе являются языки французский, немецкий и английский, а потому общедоступным может считаться лишь сочинение, написанное на этих языках. Но, кажется, нетрудно предвидеть, что это должно перемениться, что если такую значительную роль могут играть французский и немецкий, то тем более важная роль предстоит языку русскому, на котором говорит сто миллионов граждан России, движущейся быстрыми шагами по пути цивилизации и прогресса.

«Вот соображения, которые, между прочим, руководили мною с начала моей научной деятельности. Новое сочинение А. Шенфлиса достаточно оправдывает правильность моей точки зрения. В нем чистокровный представитель западноевропейской науки оказывается знакомым, хотя и не совершенно, с русским языком, пользуется русскими сочинениями и даже приводит их некоторые заглавия напечатанными русским шрифтом. Такой чести удостоились сочинения „Начала учения о фигурах“ и „Симметрия правильных систем фигур“. Он отдает полную справедливость тому, что ему известно в русских сочинениях, и в словах, приведенных на стр. 622, ясно высказано, что в русском сочинении уже был сделан полный вывод, который именно и составлял задачу сочинения Шенфлиса.

«И действительно, подобно тому, как в первой части его сочинения как результат выводятся те самые 32 кристаллографические системы, которые нам давно известны из сочинения А. В. Гадолина, так и во второй части выводятся те самые 230 правильных систем точек,

которые были выведены в сочинениях Вашего покорнейшего слуги».¹⁰

Об особенностях и характерном различии работ Е. С. Федорова и А. Шенфлиса дает представление следующий отрывок из статьи акад. 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».¹¹

Главную цель своих результатов Федоров видел в создании единственно возможных 230 сортов «канвы, по которой расписываются все виды кристаллических структур». Соответственно этому важнейшую часть его книги составляют 230 графиков, собранных в удивительно компактные таблицы. В 1894 г. эти графики были с некоторыми исправлениями повторены самим Федоровым в журнале «*Zeitschrift für Kristallographie*», в 1900 г. воспроизведены Х. Хильтоном в книге «Математическая кристаллография» на английском языке, а в 1919 г., с некоторыми изменениями, П. Ниггли в «Геометрической кристаллографии дисконтинуума». Если, однако, Хильтон при повторении федоровских графиков отмечал каждый раз имя автора, то Ниггли его всюду опускал. Эта несправедливость была повторена в следующем воспроизведении федоровских графиков в атласе В. Т. Астбюри и К. Ярдли (Лонсдейл), а затем и в первом издании «Интернациональных таблиц» (1935). Ошибка была исправлена по настоянию советских кристаллографов лишь во втором издании «Интернациональных таблиц» (1952).

Остановимся вкратце на сущности и значении федоровского вывода. Свой труд ученый открывает словами, которые подчеркивают связь между учением о правильных системах и теорией кристаллической структуры-

¹⁰ Е. С. Федоров. По поводу появившегося сочинения Шенфлиса по теоретической кристаллографии. Зап. Минералог. общ., т. 28, 1891, стр. 374—375.

¹¹ Н. В. Белов. Е. С. Федоров (к 40-летию со дня смерти). Федоровская сессия по кристаллографии. Изд. АН СССР, М.—Л., 1959, стр. 6.

«Представления о правильных системах фигур столь же древни, как и гипотезы о строении кристаллов; представления эти всегда шли рука об руку с этими гипотезами, составляя как бы две стороны одного и того же предмета».¹²

Далее Евграф Степанович переходит к разбору достижений Браве и Зонке: «Первые результаты математической теории правильных систем точек есть в то же время и первый триумф человеческого ума в области изучения кристаллов, так как выводы, шедшие из глубины кабинета, совпали как раз с тем, что составляло результат обширного опыта. . . Перед строгими кабинетными выводами как бы преклонилась природа, и кристаллы расположились в тех системах, которые явились необходимым выводом из понятия о правильных системах точек (пространственных решетках)».¹³

Так характеризует Федоров первые достижения в области учения о внутреннем строении кристаллов. В самом деле, четырнадцать типов решеток, теоретически выведенных Браве, по своей симметрии подразделяются на семь кристаллографических систем (сингоний), установленных опытным путем кристаллографами прошлого века Вейсом и Моосом. Это совпадение в свое время произвело огромное впечатление в ученом мире. Однако мы знаем, что существует 32 совокупности элементов симметрии (32 вида симметрии) в отношении кристаллических многогранников. Симметрия лишь семи из них, наиболее богатых элементами симметрии (полногранных классов), совпадала с симметрией элементарных ячеек в решетках Браве.

Бросается в глаза несоответствие между симметрией решеток и симметрией некоторых кристаллических форм. Так, например, оставалось совершенно непонятным, как кристаллы с кубической решеткой могут кристаллизоваться в виде тетраэдров или как могут возникать в других сингониях кристаллы в форме пирамид и т. п.

Дальнейшим шагом в этом направлении явилась теория Зонке, заменившая представление о пространственных решетках более широким понятием о правильных

¹² Е. С. Федоров. Симметрия и структура кристаллов, стр. 111.

¹³ Там же, стр. 111—112.

системах точек. Однако Зонке ограничился лишь частью таких систем, не приняв во внимание наличия операций отражения. Эта ошибка и была вскрыта Федоровым, давшим полный вывод законов симметрии для всех без исключения правильных систем фигур (или точек).

Вот как характеризует сам Евграф Степанович эти системы: «Под правильной системой фигур я подразумеваю такую бесконечную во всех направлениях совокупность конечных фигур, что если мы приведем по законам симметрии в совмещение две из фигур, входящих в состав системы, то совместятся и сами системы. . . Если в одной из фигур системы мы возьмем некоторую точку, а затем определим положение всех соответственных точек как в той же самой фигуре, так и во всех остальных фигурах, то получим правильную систему точек».¹⁴

Таковыми правильными системами точек, по мнению Федорова, являются структуры кристаллов. Точки соответствуют в них материальным элементарным частицам (в то время ученый думал, что элементарными частицами в кристаллических структурах являются группы атомов — молекулы; впоследствии исследование кристаллов с помощью рентгеновских лучей доказало наличие в структурах отдельных атомов и ионов).

Большое прогрессивное значение труда Федорова становится ясным, если вспомнить, что именно в то время на Западе были широко распространены идеалистические представления, отрицавшие реальное существование атомов. Они были особенно резко выражены в сочинениях, принадлежавших В. Оствальду, являвшемуся, по выражению В. И. Ленина, «крупным химиком и мелким философом». В противоположность Оствальду Федоров твердо держался материалистической точки зрения, что и позволило ему дать полный математический вывод всех возможных законов расположения материальных частиц в кристаллическом пространстве.

Основной целью работы Федорова являлся вывод законов симметрии, имеющих место для правильных систем фигур (или точек). Так же, как и в случае симметрии конечных фигур, эти законы соответствуют совокупностям элементов симметрии. Однако в связи с тем, что правильные системы фигур являются бесконечно протя-

¹⁴ Там же, стр. 119—120.

женными, здесь появляются новые элементы симметрии: переносы (трансляции), винтовые оси и плоскости скользящего отражения.

С помощью переноса (трансляции) вся система передвигается параллельно самой себе (после переноса, так же, как и после всякого симметрического преобразования, вся система целиком совмещается сама с собой). Переносы возможны лишь в бесконечных фигурах. Винтовая ось соответствует совокупности оси симметрии и параллельного ей переноса, действующих не по отдельности, а совместно (рис. 17). Винтовые оси в кристаллических структурах, аналогично простым осям в кристаллах, могут быть только двойными, тройными, четверными и шестерными.

Плоскость скользящего отражения представляет собой совокупность плоскости симметрии и параллельного ей переноса, также действующих не порознь, а совместно (рис. 18).

Итак, в правильных системах фигур могут присутствовать следующие элементы симметрии: простые оси (L_2, L_3, L_4, L_6), сложные оси симметрии (L_{i_4}, L_{i_6}), винтовые оси симметрии ($L_{t_2}, L_{t_3}, L_{t_4}, L_{t_6}$), плоскости симметрии (P), плоскости скользящего отражения (P_t), переносы (T) и центры инверсии (C). (Приведенные нами обозначения были впоследствии выработаны Федоровским институтом. Сам Федоров пользовался другими обозначениями).

Второе отличие совокупностей элементов симметрии для бесконечных правильных систем фигур заключается в том, что в них имеются серии взаимно параллельных осей и плоскостей симметрии (в конечных фигурах все элементы симметрии должны пересекаться в одной точке). В результате вывода Федоров получил 230 совокупностей элементов симметрии, 230 пространственных групп. Уничтожив в пространственных группах переносы и превратив винтовые оси и плоскости скользящего отражения в простые оси и плоскости симметрии, мы получим

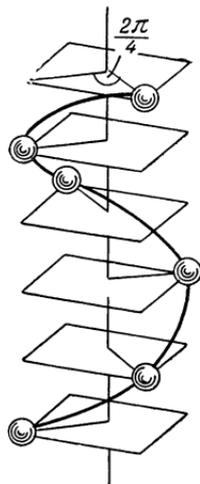


Рис. 17. Винтовая ось симметрии четвертого порядка.

32 вида симметрии. И наоборот, прибавляя к элементам симметрии 32 видов переносы, а также превращая целиком или частично оси и плоскости симметрии в винтовые оси и плоскости скользящего отражения, мы перейдем от 32 исходных видов симметрии к 230 разновидностям, выведенным Федоровым.

Для того чтобы яснее себе представить такую операцию, вспомним хорошо известное с детства занятие. Возьмем

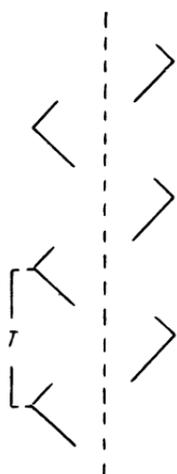


Рис. 18. Плоскость скользящего отражения.

лист бумаги, сложим его несколько раз и вырежем фигурку какого-нибудь человечка так, чтобы сложенные участки листа оставались соединенными между собой. Развернув бумагу с вырезкой, мы получим вместо одного человечка множество таких же человечков, закономерно повторяющих друг друга. Представим себе, что наш лист бумаги простирается в бесконечность. В фигурке одного человечка мы сможем провести лишь одну плоскость симметрии, разделяющую фигурку на две зеркально равные части. На развернутом бесконечном листе для бесконечно размножившихся человечков обнаружится бесчисленное множество взаимно параллельных плоскостей симметрии. Вид симметрии относится к пространственной группе Федорова так же, как сложенный и развернутый лист бумаги с вырезанной на нем фигуркой.

Глубокий смысл имеет федоровское разделение 230 пространственных групп на симморфные, гемисимморфные и асимморфные.

Симморфными называются группы, в которых параллельно каждой оси (L) исходного вида симметрии в пространственной группе проходят оси (L) или совместно и простые оси, и винтовые оси (L и L_t), а параллельно каждой плоскости симметрии (P) проходят плоскости симметрии (P) или совместно и плоскости симметрии, и плоскости скользящего отражения (P и P_t).

Асимморфные группы — это те, где параллельно хотя бы одной оси (L) исходного вида симметрии в про-

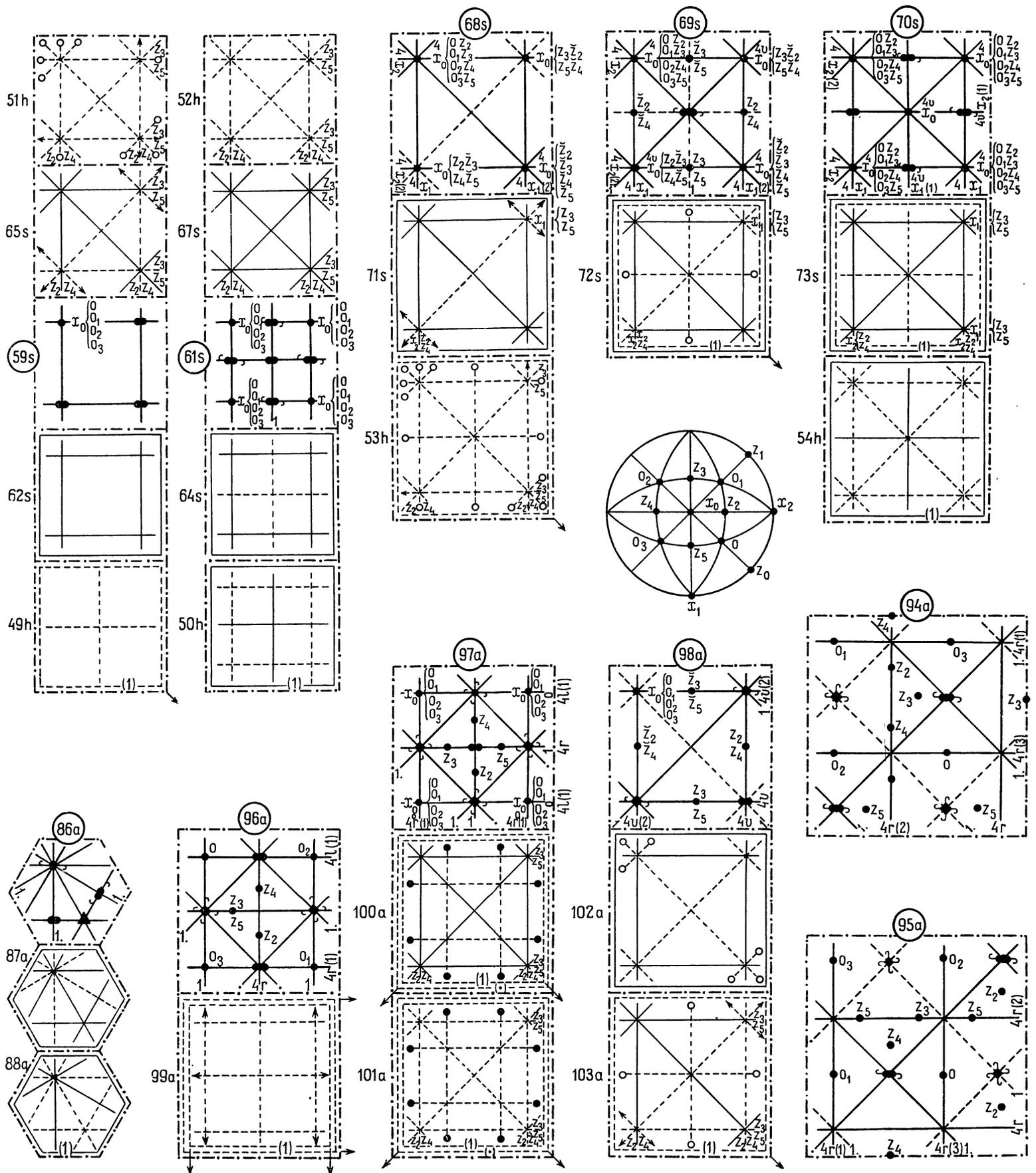


Рис. 19. Часть таблицы с федоровскими диаграммами пространственных групп.

пространственной группе проходят только винтовые оси (L_t).

И, наконец, гемисимморфные группы — это такие, в которых параллельно хотя бы одной плоскости симметрии (P) исходного вида симметрии в пространственной группе проходят только плоскости скользящего отражения (P_t) при условии, если такая группа не является асимморфной.

Так же, как и виды симметрии, все пространственные группы охарактеризованы Федоровым специальными алгебраическими уравнениями. Кроме того, ученый изобразил их в виде наглядных диаграмм (рис. 19). Предельную наглядность последние получили в статьях Еврафа Степановича, посвященных теории кристаллических структур («Теория строения кристаллов». Введение). Как уже указывалось, впоследствии изображения эти с незначительными и не всегда удачными дополнениями были воспроизведены рядом иностранных авторов, не считавших даже нужным упомянуть имя их русского создателя. В настоящее время они нашли себе место в «Интернациональных таблицах для определения кристаллических структур».

Крупнейший советский кристаллограф акад. Н. В. Белов по этому поводу писал: «Итак, всякий раз, когда структурщик обращается к совершенно ему необходимой при работе диаграмме пространственной группы в Интернациональных таблицах, он должен помнить, что перед ним диаграмма нашего величайшего кристаллографа. Постоянно повторяемые нами детали этих чертежей — паукообразные изображения осей разных порядков и т. д. и т. п. — это буквальный миллион, размененный на гривенники, и нам, советским научным работникам, должно это твердо помнить и потребовать, чтобы этого не забывали вольно или невольно и другие слишком забывчивые их потребители».¹⁵

На рис. 20 изображена одна из пространственных групп, выведенных Федоровым.¹⁶ Маленькие треугольнички по-

¹⁵ Н. В. Белов. Великий русский кристаллограф и его детище. В кн.: Е. С. Федоров. Симметрия и структура кристаллов. Изд. АН СССР, 1949 (серия «Классики науки»), стр. 585—586.

¹⁶ Рисунок взят из кн.: А. В. Шубников, Е. Е. Флинт, Г. Б. Боккй. Основы кристаллографии. Изд. АН СССР, М., 1940.

казывают выходы осей симметрии третьего порядка, перпендикулярных плоскости чертежа (все оси параллельны друг другу). Кроме того, здесь имеется серия плоскостей симметрии, также перпендикулярных плоскости чертежа. Следы пересечения этих плоскостей симметрии с плоскостью чертежа изображены на рис. 20 прямыми линиями. Зная совокупности элементов симметрии, можно предсказать, как будут располагаться в том или ином случае элементарные частицы кристаллических структур, т. е. атомы.

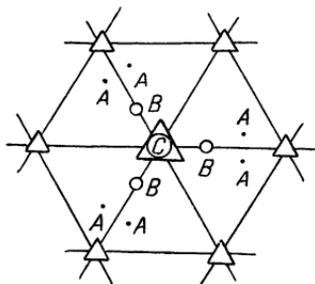


Рис. 20. Расположение элементарных частиц в одной из федоровских пространственных групп.

Попробуем с этой точки зрения разобрать приведенный рисунок. Возьмем на участке, расположенном вокруг одной из изображенных тройных осей, некоторую элементарную частицу A , лежащую вне оси. Вследствие тройной симметрии мы найдем всего три таких частицы, окружающие тройную ось. Число это надо удвоить в том случае, если взятая нами частица лежит вне плоскости симметрии (так как отражение в плоскости даст вторую

такую же частицу). Следовательно, мы получим всего шесть одинаковых частиц A . Взяв частицу B на плоскости симметрии, но вне тройной оси, увидим, что она повторится вокруг тройной оси трижды. На рисунке это будут маленькие белые кружочки, обозначенные буквой B . Наконец, частица, лежащая на самой тройной оси и одновременно на пересечении трех плоскостей симметрии, по отношению к данной тройной оси будет единственной. Таков большой белый кружок C , совпадающий с треугольничком тройной оси.

Мы принимали во внимание лишь отдельный участок чертежа. Узор, изображенный на рис. 20, можно продолжить на плоскости во все стороны до бесконечности. Соответственно повторится бесконечное число раз и разобранный нами сочетание частиц. Легко понять, что кристаллическая структура с таким сочетанием атомов будет иметь химический состав, соответствующий формуле A_6B_3C , где A , B и C — некоторые химические элементы.

После сказанного ясно, что в каждом из 230 законов симметрии, выведенных Федоровым, могут кристаллизоваться лишь определенные химические соединения, так как относительные количества атомов, входящих в химическое соединение, не являются произвольными. Они обусловлены законом кристаллографической симметрии.

Связь химического состава и симметрии была впервые четко сформулирована выдающимся советским кристаллографом акад. А. В. Шубниковым. Закон Шубникова всецело основывается на гениальном выводе Федорова, который, к сожалению, в свое время остался совершенно непонятым, что видно хотя бы из того, что Академия наук даже отказалась рассматривать работу Евграфа Степановича, представленную на соискание премии.

Триумф идей Федорова наступил только через двадцать с лишним лет после того, как были опубликованы сделанные им выводы.

В 1912 г. была открыта возможность изучения кристаллических структур с помощью рентгеновских лучей. Рентгеноанализ позволил как бы заглянуть внутрь структур, давая точное понятие о пространственном расположении атомов в кристаллах и о расстояниях между ними. Последние оказались чрезвычайно малыми, но все же конечными. Измеряются они особыми единицами — ангстремами.¹⁷

Первые же исследования кристаллических структур при помощи рентгеновских лучей доказали, что строение кристаллов действительно является решетчатым. В узлах кристаллических решеток обычно располагаются атомы или ионы (атомы, несущие заряды). Такова, например, структура поваренной соли, изображенная, по данным рентгеноанализа, на рис. 21 и состоящая из ионов натрия и хлора. В плоскости грани куба ионы натрия и хлора

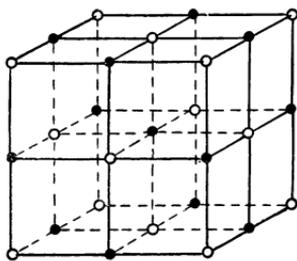


Рис. 21. Структура каменной соли (NaCl).

¹⁷ Ангстрем равен 10^{-8} см.

чередуются через один, подобно белым и черным клеткам шахматной доски.

Таким образом, опытные данные блестяще подтвердили теоретические высказывания великих кристаллографов прошлого и в первую очередь высказывания Федорова. Следует лишь иметь в виду, что в реальных кристаллических структурах мы обычно имеем как бы несколько одинаковых решеток, закономерно вдвинутых друг в друга. Геометрический закон, по которому располагаются в пространстве атомы или ионы, входящие в некоторую кристаллическую структуру, должен соответствовать одному из 230 законов Федорова.

Рентгенолог, расшифровывающий по полученным им опытным данным строение кристаллов, сперва определяет совокупность имеющихся в них элементов симметрии, т. е. устанавливает тот геометрический закон Федорова, которому подчинено исследуемое вещество. Найдя полную совокупность плоскостей и осей симметрии, он как бы получает геометрический скелет кристаллической структуры. Дальнейшая его задача заключается в определении расположения атомов или ионов относительно элементов симметрии. Сухой геометрический скелет — совокупность воображаемых осей, плоскостей и точек — начинает обрастать реальными материальными частицами — атомами или ионами. Тем самым скелет приобретает как бы плоть и кровь. В результате получается полное представление о реальной структуре, реальном внутреннем строении того или иного кристаллического тела. Совокупность элементов симметрии играет при этом огромную роль, давая тот схематический узор, на основании которого можно восстановить всю сложную постройку из атомов или ионов, слагающих кристалл.

Даже для самого Федорова возможность определять реальные кристаллические структуры с помощью рентгеновских лучей явилась неожиданностью. По его словам, он и не думал дожить до такого триумфа своих идей. В одном из его писем к профессору Гроту высказывается предположение, что определение реальных кристаллических структур начнется не ранее, чем через сто лет. Быстрое развитие науки значительно опередило предсказание Евграфа Степановича. Ему посчастливилось дожить до блестящего подтверждения своих гениальных теоретических высказываний.

Современная рентгенометрия кристаллов, давшая огромное количество определений реальных структур, целиком базируется на геометрических законах Федорова. Расшифровка первых кристаллических структур, произведенная в 1913 г., явилась величайшим торжеством русской научной мысли, подтвердив на основе опытных данных теоретические построения ученого, опубликованные еще в 1890 г.



ФЕДОРОВСКИЙ ГОНИОМЕТР И ФЕДОРОВСКИЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТОЛИК

21 ноября 1889 г. на заседании Минералогического общества Евграф Степанович впервые выступил с заявлением об изобретении им нового теодолитного метода в области измерения кристаллов. По этому поводу в протоколе упомянутого заседания говорится: «Е. С. Федоров обратился к Обществу с просьбой оказать материальное и нравственное содействие в предпринимаемом сооружении гониометра, имеющего целью ускорить и упростить манипуляции, связанные с измерением кристаллов».

Далее следует описание самого прибора, приближающегося по своему устройству к теодолиту — инструменту, хорошо знакомому каждому, занимавшемуся топографией и геодезией.

Впоследствии Евграф Степанович неоднократно ссылался на дату этого выступления: «В первый раз идея применения метода, изложенного в этом сочинении, была публично заявлена мною в ноябре 1889 года на заседании С.-Петербургского минералогического общества».¹

В статье «О преподавании минералогии в высших учебных заведениях» он писал: «Приоритет принадлежит и признан за русским автором, впервые опубликовавшим предварительную заметку об этом методе еще в 1889 году».²

В мае 1891 г. Федоров сделал заявку в Геологическом комитете на изобретенный им универсальный столик для

¹ Е. С. Федоров. Теодолитный метод в минералогии и петрографии. Тр. Геол. ком., 1893, т. X, № 2, стр. 1.

² Изв. общ. горных инженеров, 1893, № 5, стр. 12. Недавно обнаружилось, что идея измерения кристаллов на двукружном гониометре была до Федорова использована в 1874 г. английским кристаллографом В. Г. Миллером, который приспособил для этого два однокружных гониометра. (В. А. Франк-Каменецкий. «К истории создания теодолитного гониометра». Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955).

микроскопа. Оба прибора были готовы в конце того же года. Спустя немногим более полугода, 7 января 1892 г., он уже сообщал в Минералогическом обществе о сконструированном им универсальном столике, предназначенном «для более точного изучения оптических свойств кристаллических пластинок под микроскопом». Впоследствии этому прибору суждено было под именем «федоровского столика» сделать имя своего создателя известным всему миру. Теперь в каждой лаборатории, где кристаллографами, минералогами, петрографами, химиками ведутся кристаллооптические исследования, микроскоп неизбежно сопровождается федоровским столиком.

В 1893 г. в Трудах Геологического комитета была опубликована знаменитая монография Евграфа Степановича, целиком посвященная его методу, — «Теодолитный метод в минералогии и петрографии».

В чем же состоит сущность предложенного Федоровым метода? Что представляют собой оба его, столь широко теперь известных прибора? Здесь мы остановимся лишь вкратце на основных принципах теодолитного метода, а также на том существенно новом, что было внесено этим методом в науку. С этой целью мы обратимся сначала к федоровскому теодолитному гониометру. Однако прежде чем рассказать об этом приборе, следует хотя бы в нескольких словах вспомнить о его предшественниках.

Читатель уже знает, какое огромное значение в кристаллографии имеет закон постоянства углов. Изучая тот или иной кристалл, в первую очередь надо принять во внимание углы между его гранями, так как угловые значения являются характерными постоянными величинами для всех без исключения кристаллов определенного вещества. В XVIII в. сотрудник Ромэ Делиля механик Каранжо сконструировал прикладной гониометр — первый прибор для измерения угловых величин на кристаллах. Этот инструмент представляет собой крайне несложную конструкцию (рис. 22). Измеряемый кристалл (*K*) зажимается между двумя металлическими линейками *AB* и *CD*. Отсчет производится с помощью *AB* по транспортиру. Само собой разумеется, что точность измерений на таком инструменте очень невелика (не более полуградуса). Сейчас этим гониометром пользуются лишь в тех случаях, когда необходимо приблизительно определить углы на крупных кристаллах.

В начале прошлого столетия прикладной гониометр Каранжо был вытеснен однокружными отражательными гониометрами Волластона и Митчерлиха. Схема такого

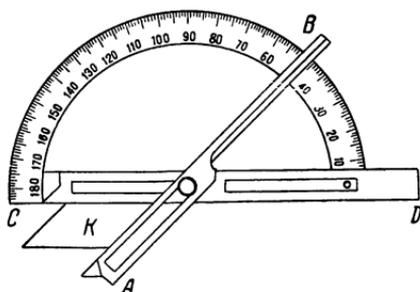


Рис. 22. Прикладной гониометр Каранжо.

гониометра показана на рис. 23. Он состоит из металлического градуированного лимба L , в центре которого прикреплется кристалл K , освещаемый сбоку источником света S . Измерение кристаллов на этом приборе основано на отражении лучей источника света от блестящих кристаллических граней.

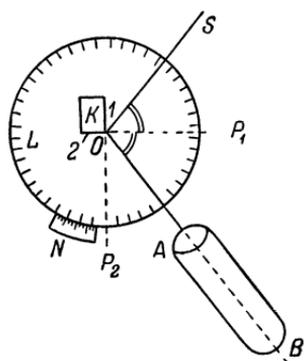


Рис. 23. Однокружный отражательный гониометр Волластона и Митчерлиха.

Вращая лимб вместе с кристаллом, следует добиться того, чтобы отраженный от грани луч попал в зрительную трубу AB . В этот момент наблюдатель, смотрящий в трубу, увидит освещенную грань и возьмет отсчет на градуированном лимбе при помощи нониуса N . Продолжая затем вращать лимб с кристаллом, он уловит второй отраженный луч от второй кристаллической грани и произведет второй отсчет на лимбе. Разница между этими двумя отсчетами и даст угол между нормальными к двум граням кристалла.

Описанный прибор отличается большой точностью (до минут), однако он имеет и ряд существенных неудобств

для исследователя. В самом деле, при измерении угла между двумя гранями кристалл должен быть установлен на лимбе так, чтобы ребро пересечения обеих граней в точности совпадало с осью вращения лимба. При этом переход от одного угла к другому на одном и том же кристалле связан с перестановкой кристалла на приборе. «Вся суть в том, — пишет по этому поводу Евграф Степанович, — что инструменты, употреблявшиеся до сих пор для гониометрических исследований и основанные на волластоновском принципе отражения сигнала от кристаллических граней, имели одну и только одну ось вращения».³ Таким образом, измерительная работа кристаллографа того времени была необычайно трудоемкой и кропотливой. Невольно вспоминаются известные стихи Ломоносова, содержащие шуточный ответ повара Птоломею и Копернику:

Кто видел простака из поваров такого,
Который бы вертел очаг кругом жаркого?

Именно такого простака и напоминают нам прежние кристаллографы. В самом деле, вокруг маленького кристаллика, установленного в центре лимба, без конца приходилось хлопотать ученому, измерявшему углы между кристаллическими гранями. Сколько терпения и трудолюбия требовалось тогда от гониометриста!

В старых руководствах работа на гониометре сравнивается в смысле точности и ловкости с искусством фехтовальщика.

Известный минералог прошлого столетия И. А. Брейтгаупт отмечал, что «кристаллоизмерению научаются с большим трудом, а чаще всего и вовсе не научаются». В связи с этим становится понятным, почему точным гониометрическим работам прежде придавалось такое большое значение, а опытные гониометристы считались незаурядными учеными. К числу последних принадлежали и учителя Евграфа Степановича по Горному институту академики Н. И. Кокшаров и П. В. Еремеев.

Но возвратимся к федоровскому двукружному теодолитному гониометру, который произвел полный переворот в области кристаллоизмерения. Он состоит не из одного, а из двух градуированных лимбов: вертикального

³ Е. С. Федоров. О преподавании минералогии, стр. 12.

и горизонтального. Отсюда и название его — двукружный гониометр (рис. 24). Вертикальный лимб вращается вокруг горизонтальной оси; соответственно горизонтальный лимб вращается вместе с вертикальным лимбом вокруг вертикальной оси. Кристалл помещается в точке пересечения этих двух осей на особой восковой подставке, находящейся в середине вертикального лимба. Сбоку его

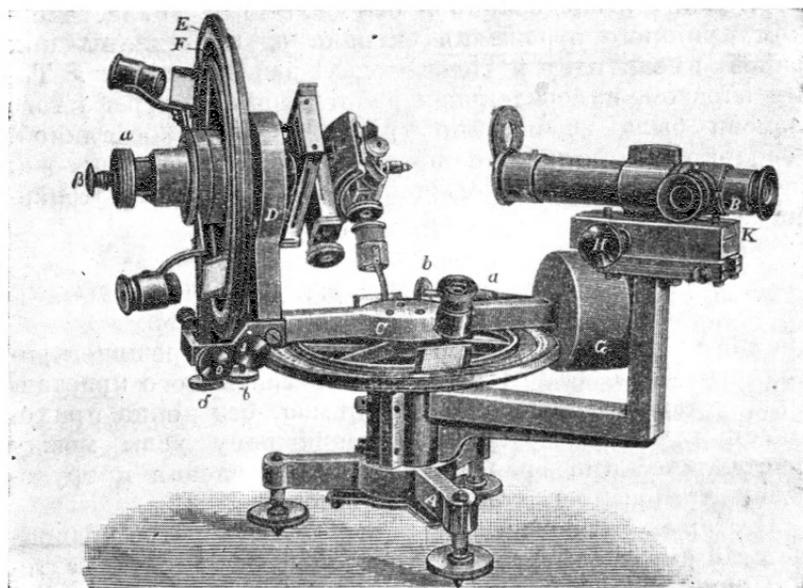


Рис. 24. Двукружный отражательный гониометр Федорова.

освещает специальный источник света. Установленный таким образом кристалл вращается вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Любую его грань можно как угодно ориентировать относительно источника света и в результате получить от нее отблеск. В этот момент и следует делать отсчеты по обоим лимбам. Задача исследователя состоит в улавливании отблесков, получающихся при освещении кристаллических граней. Кристалл считается полностью измеренным, если для каждой его грани уловлен отблеск и взяты два отсчета: один по горизонтальному, а другой — по вертикальному лимбу. Эти два от-

счета соответствуют двум координатам (подобным широте и долготе в географии), дающим понятие о пространственном расположении данной грани относительно других граней того же кристалла. Путем вращения кристалла вокруг обеих гониометрических осей можно найти координаты для всех его граней (не измеренными останутся лишь грани, заклеенные восковой подставкой, к которой прикреплен кристалл).

Работать на двукружном гониометре несравненно проще, чем на однокружном. Вот что пишет по этому поводу автор теодолитного гониометра в своем «Курсе кристаллографии»: «Научиться производить точные измерения с помощью универсального гониометра так же легко, как научиться обращению с мензулой, нивелиром или теодолитом, а этому научаются, как известно, лица, не получившие не только высшего, но даже и среднего образования, например ученики низших горных училищ».⁴

Вслед за появлением федоровского гониометра несколько иностранных ученых предложили свои конструкции двукружных гониометров. В частности, через четыре года после Федорова это сделали В. Гольдшмидт и С. Чапский. В настоящее время во всем мире исследователи кристаллов работают исключительно на двукружных гониометрах и с их помощью в кратчайший срок определяют точные угловые величины кристаллов.

Еще более крупный переворот был произведен Федоровым в области кристаллооптической методики, имеющей огромное значение в минералогии, петрографии, физике и химии.

Из физики известно, что поведение световых лучей в кристаллах весьма своеобразно. Так, например, луч, входящий в кристалл исландского шпата (прозрачного кальцита — углекислого кальция), раздваивается. В связи с этим надпись или рисунок, рассматриваемые сквозь него, кажутся удвоенными. Способность более или менее сильно удваивать лучи свойственна всем кристаллам, за исключением тех, которые принадлежат к кубической сингонии.

Помимо этого, лучи, идущие по различным направлениям в одном и том же кристалле, обычно распростра-

⁴ Е. С. Федоров. Курс кристаллографии. СПб., 1901, стр. 279.

няются с неодинаковой скоростью. Для того чтобы наглядно представить себе сложные оптические свойства кристаллов, прибегают к специальным теоретическим построениям, в результате которых получаются вспомогательные фигуры — «оптические индикатрисы».

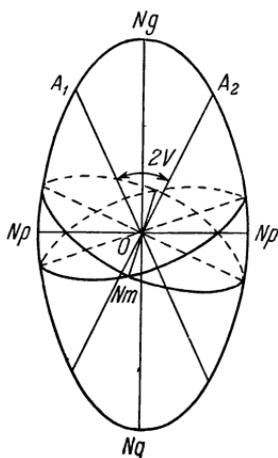


Рис. 25. Оптическая индикатриса для кристалла низшей категории сингоний, имеющая форму эллипсоида с тремя неравными осями Ng , Nm , Np . A_1 и A_2 — оптические оси, являющиеся нормальными к двум круговым сечениям трехосного эллипсоида, $2V$ — угол между оптическими осями.

Оптическими индикатрисами называются особые замкнутые фигуры, при помощи которых можно выразить оптические свойства кристаллов. Каждый отрезок, соединяющий любую точку поверхности такой фигуры с ее центром, соответствует показателю преломления луча, распространяющегося в кристалле по нормали к этому отрезку (показателем преломления называется отношение скорости света в безвоздушном пространстве к его скорости в данном теле).

Оптическая индикатриса есть лишь вспомогательное геометрическое построение, облегчающее изучение оптических свойств кристаллов. В общем случае индикатрисы имеют форму эллипсоидов с тремя неравными осями (рис. 25). В частном случае они принимают вид эллипсоидов вращения (рис. 26). Понятие о форме эллипсоида вращения можно получить, вращая плоский эллипс вокруг одной из его осей. Вращая такой эллипс вокруг длинной его оси, получим вытянутый («положительный») эллипсоид вращения (рис. 26, а). Вращение эллипса вокруг короткой оси даст нам сплюснутый («отрицательный») эллипсоид вращения (рис. 26, б). Частным случаем эллипсоида вращения является шар.

Форма оптической индикатрисы тесно связана с симметрией кристалла. Так, например, в кубических кристаллах, обладающих несколькими осями симметрии порядка выше двух (четырьмя тройными осями), оптическая индикатриса имеет форму шара. Шаровая индикатриса

свойственна всем кубическим кристаллам, являющимся представителями высшей категории (сюда относится поваренная соль, алмаз, гранаты и т. д.).

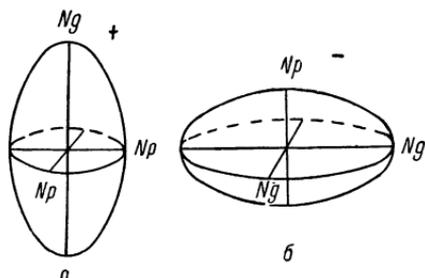


Рис. 26. Оптические индикатрисы для кристаллов средней категории сингоний, имеющие формы вытянутых (а) и сплюснутых (б) эллипсоидов вращения.

В кристаллах средней категории, имеющих только одну ось порядка выше двух (тройную, четверную или шестерную ось симметрии), оптическая индикатриса имеет форму эллипсоида вращения (такой индикатрисой характеризуются, например, оптические свойства кварца, обладающего одной тройной осью).

Важно отметить, что оптический эллипсоид вращения ориентирован в кристаллах средней категории так, что его ось вращения совпадает с единственной осью симметрии высшего порядка. На рис. 27 ось вращения эллипсоида совпадает с осью симметрии шестого порядка.

В кристаллах нижней категории оси симметрии порядка выше двух отсутствуют. Оптическая индикатриса здесь имеет форму эллипсоида с тремя неравными осями. Углы, образуемые осями индикатрисы с ребрами и гранями кристалла, а также с плоскостями спайности, являются важными величинами, характеризующими то или иное кристаллическое вещество. Оптическое исследование кристаллов и сводится к изучению

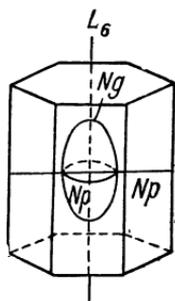


Рис. 27. Ориентировка оптической индикатрисы в гексагональном кристалле.

названных эллипсоидов и нахождению их ориентировки в кристалле.

Изучив оптическую индикатрису кристалла, мы тем самым получаем понятие об его оптических особенностях. Обычно кристаллооптические исследования производятся с помощью специального (поляризационного) микроскопа. В качестве объектов изучения берутся тончайшие срезы из кристаллов, так называемые шлифы. Для того чтобы получить всестороннее понятие об оптическом эллипсоиде, предшественники Федорова изготовляли множество различно ориентированных шлифов из одного и того же кристалла. Только тщательное изучение всех таких разрезов давало возможность получить представление об оптической индикатресе и ее ориентировке. В этом отношении работа прежних кристаллооптиков по кропотливости и трудоемкости напоминает труд старых гониометристов. И те и другие должны были тратить много усилий и времени.

Федоровский метод устраняет все такие затруднения. Вот как описывает сущность его академик А. Н. Заварицкий:

«Е. С. Федоровым был предложен новый метод кристаллооптических исследований, который он назвал теодолитным методом и который впоследствии получил название универсального, так как этот метод может быть применен для исследования любого зерна минерала в микроскопическом препарате. Первоначальное название — теодолитный метод — лучше отражает его сущность, заключающуюся в том, что при его применении искомое направление в кристалле может быть определено так же, как определяются направления при помощи теодолита, то есть посредством вращения двух осей этого прибора — одной подвижной, а другой неподвижной, причем эти оси перпендикулярны одна к другой. В своем первом докладе об изобретенном им приборе, служащем для этой цели, — „универсальном столике“, — докладе, сделанном в годовом собрании Минералогического общества в 1892 г., Е. С. Федоров так определил сущность этого прибора: он „служит для того, чтобы можно было выводить кристаллооптические пластинки из горизонтального положения в произвольное другое. Два лимба с нониусами служат для измерения тех двух углов, которыми определяется положение пластинки в пространстве“. Эти два лимба

являются существенными частями столика, будучи теми двумя теодолитными осями, которые нужны, чтобы определить относительное расположение различных направлений в кристалле».⁵

Универсальный теодолитный столик привинчивается к обычному столику микроскопа. Исследуемый препарат помещается посередине столика Федорова и может наклоняться вокруг осей последнего. Наклоняя столик в разные стороны, мы можем исследовать один и тот же кристалл в различных ориентировках относительно оси микроскопа, независимо от того, как был проведен разрез шлифа в кристалле.

Таким образом, изучение лишь одного кристаллического зерна в шлифе на федоровском столике дает всестороннюю характеристику оптического эллипсоида. Нет надобности говорить о том, во сколько раз это упростило и ускорило труд исследователей. Сам Евграф Степанович говорил об этом так: «Новый метод характеризуется как особенной простотой теории, так и несравненным сокращением труда в применении его на практике. Автор питает полную уверенность, что каждый, кто поработал этим приемом, не пожелает возвратиться к более сложным и несовершенным».⁶

Стоит привести описание простейшей конструкции столика, сделанное Федоровым и помещенное в его «Сокращенном курсе кристаллографии».

«Оптические определения чрезвычайно разнообразятся и достигают более точных и полных результатов, если присоединить к поляризационному микроскопу особый прибор, называемый „универсальным столиком“».⁷

Прибор этот непосредственно насаживается на обыкновенный столик микроскопа и прикрепляется к нему двумя пружинками. Назначение этого прибора — приводить плоскость препарата в самые разнообразные положения в пространстве.

В простейшем виде столик состоит из основной пластинки *P* с большим круглым отверстием и прикреплен-

⁵ А. Н. Заварицкий. Дальнейший шаг в применении универсального столика. Сб. «Универсальный столик Е. С. Федорова», Изд. АН СССР, М., 1953, стр. 763.

⁶ Е. С. Федоров. Курс кристаллографии. СПб., 1897, стр. XVI.

⁷ Е. С. Федоров. Сокращенный курс кристаллографии. СПб., 1910, стр. 187.

ных к ней двух вертикальных стоек, между которыми за пуговку T вращается пластинка с круглым отверстием, в которое вставляется препарат (рис. 28, а). С помощью этого приспособления препарат может быть подвергнут вращению: а) около горизонтальной оси, называемой *неподвижной*, которую мы обозначим I (*Immobile*, рис. 29), и б) около оси, перпендикулярной к его плоскости (и проходящей через его центр), и, очевидно, вращающейся вместе с препаратом около оси I ; эту подвижную ось будем обозначать через M (*Mobile*, рис. 29). Столик всегда устанавливается так, чтобы ось I была параллельна горизонтальной нити креста окуляра.

«Уже при этом устройстве столика мы можем более или менее произвольно выбранное направление привести в вертикальное положение, т. е. совместить с осью микроскопа. Для этого вращаем сначала препарат около оси M , пока избранное направление не попадет в вертикальную плоскость, перпендикулярную к оси I , а затем вращением около этой оси приводим непосредственно это направление в вертикальное положение. Если принять во внимание, что мы можем отсчитать углы поворота около обеих осей, для чего сделано два маленьких лимба, соответственно каждому вращению, то легко понять, что мы можем дать себе строгий отчет или графически изобразить пространственное положение того направления, которое мы привели к вертикальности».⁸ Приведенное описание относится к самой первой модели прибора.

С течением времени федоровский столик, а вместе с ним и теодолитный метод видоизменялся и совершенствовался.

«История развития федоровского метода очень поучительна. Он не появился сразу в готовом виде подобно Афине древнего мифа, родившейся из головы Зевса. В течение не менее десяти лет сам Е. С. Федоров разрабатывал и совершенствовал свой метод, а затем дальнейшие шаги были сделаны его учениками». Такими словами открывается история федоровского кристаллооптического метода в недавно вышедшем фундаментальном сборнике «Универсальный столик Е. С. Федорова».⁹

⁸ Там же, стр. 188.

⁹ Сб. «Универсальный столик Е. С. Федорова», стр. 3.

Долгое время в большинстве кристаллооптических лабораторий были в ходу универсальные столики, допускающие вращение исследуемого препарата вокруг четырех осей: 1) оси N , всегда нормальной к плоскости шлифа и перпендикулярной к оси H ; 2) оси H , всегда лежащей в плоскости шлифа и перпендикулярной к осям M и N ; 3) оси M , всегда перпендикулярной к осям I и H ; 4) оси I , всегда перпендикулярной к оси M , и оптической

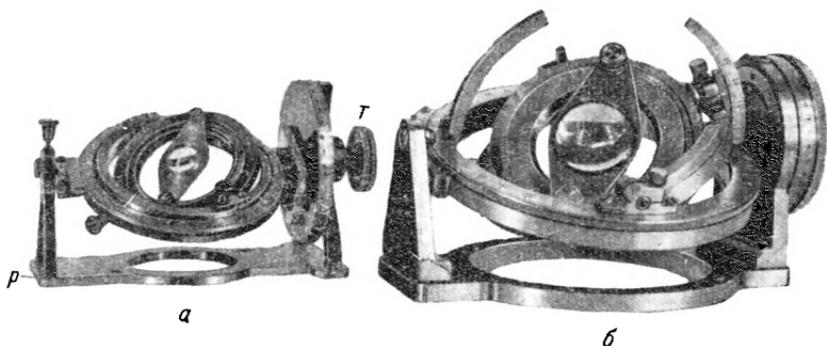


Рис. 28. Ранняя (а) и современная (б) конструкции федоровского столика для микроскопа.

оси микроскопа (рис. 29). Кроме того, весь столик мог вращаться вокруг оси предметного столика микроскопа, совпадающей с оптической осью микроскопа. Важной частью прибора являлись стеклянные полушария (сегменты), между которыми глицерином заклеивался препарат. Без таких полушарий при наклонах столика возникали вследствие преломления света существенные отклонения лучей, выходящих из кристалла в воздух.

Дальнейшее развитие федоровского метода стало возможным благодаря дополнению новой осью K , превратившей столик в пятиосный. Схема такого пятиосного столика, изготовляемого советскими заводами, изображена на рис. 29. В последнее время В. А. Заварицкий поднял вопрос о новом возможном усовершенствовании универсального столика путем добавления еще шестой оси. Такой прибор носит уже название «двойного теодолитного федоровского столика». Три внутренние оси шестиосного

столика используются для определения кристаллооптических свойств минерала, т. е. нахождения осей оптической индикатрисы, а также и оптических осей. Три внешние оси прибора служат для исследования кристаллографических свойств (кристаллографическими элементами являются плоскости спайности, грани, кристаллографические оси и др.). Итак, в ходе развития метода существенно видоизменилась конструкция федоровского столика, менялись и приемы исследования.

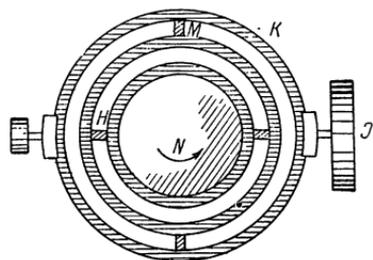


Рис. 29. Схема пятиосного федоровского столика.

Однако «основной принцип метода, как теодолитного, остается и это определяет его суть».¹⁰

Применение федоровского столика оказалось наиболее плодотворным в минералогии и особенно в науке о горных породах — петрографии. В самом деле, горные породы в большинстве случаев представляют скопления зерен отдельных минералов. Для исследования их под микроскопом изготавливаются

специальные шлифы, плоскости которых совпадают со случайными сечениями кристаллических зерен.

Федоровский столик дает возможность произвести исчерпывающие кристаллооптические исследования любого такого зерна. Тем самым он позволяет определить на основе оптических данных различные минералы, слагающие ту или иную породу, а следовательно, решить вопрос и о ее составе. Мало того, универсальный метод особенно удобен для изучения закономерностей, связывающих оптические константы минералов и их химический состав.

При помощи своего столика Федоров в первую очередь детально изучил группу таких важных породообразующих минералов, как полевые шпаты. Химический состав последних чрезвычайно сложен. Они состоят главным образом из окислов кремния, алюминия, калия, натрия и кальция. В связи с этим различают калиевые, натрие-

¹⁰ Там же.

вые и кальциевые полевые шпаты. Особенно трудно определение натриевых и кальциевых полевых шпатов, так как, помимо чистого натриевого полевого шпата — альбита и чисто кальциевого полевого шпата — анортита, имеется непрерывный ряд переходов между ними (ряд плагиоклазов). Федоровский метод дает возможность, основываясь на данных кристаллооптического изучения, с точностью до одного процента определить состав исследуемого полевого шпата. Важную роль при этом играет тщательное изучение закономерных кристаллических сростаний, так называемых «двойников». Именно поэтому в работах по универсальному методу особенное внимание уделяется исследованию двойниковых кристаллов.

Применение нового метода для практического исследования уральских горных пород и слагающих их минералов дало Федорову материал для цикла замечательных статей «Универсальный метод и изучение полевых шпатов» (1896—1898). В них, помимо описания основных приемов универсального метода оптических исследований, содержатся специальные диаграммы, позволяющие по оптическим данным определять состав плагиоклазов. Эти диаграммы в дополненном и обновленном виде сохраняют все свое значение и сейчас. Они основаны на том, что в смешанном плагиоклазовом кристалле с изменением содержания его компонентов — альбита и анортита — изменяется и ориентировка оптической индикатрисы относительно кристаллографических элементов кристалла (граней, плоскостей, спайности, границ и осей двойниковых сростков).

Е. С. Федорову и его ученикам удалось это изобразить на диаграммах, пользуясь которыми, мы по ориентировке оптической индикатрисы определяем состав изучаемого плагиоклаза. По такому же принципу построены теперь диаграммы и для многих других минералов.

В последние годы выявилось и еще одно очень важное применение федоровского столика.

В новом разделе современной петрографии — структурной петрологии — большое значение играет микроструктурный анализ горных пород, устанавливающий закономерности ориентировки составных частей породы. Дело в том, что при кристаллизации текущей магмы или

под влиянием процессов давления кристаллические зерна закономерно ориентируются относительно друг друга, образуя характерные узоры горной породы — линейные, слоистые и т. п. Так, например, в некоторых породах вытянутые в одном направлении кварцевые зерна или листочки слюды располагаются параллельно друг другу. Изучение упомянутых узоров горных пород имеет огромное значение, так как дает понятие об особенностях их образования. К сожалению, такие закономерности часто не бросаются в глаза, их приходится устанавливать статистически с помощью микроскопических методов исследования. Вот здесь-то и приходит на помощь федоровский столик, позволяющий изучать взаимную ориентировку минералов в горной породе. Структурная петрология выросла сейчас в целое научное направление большой практической важности. Вместе с тем, говоря об этом направлении, нельзя не упомянуть и маленький федоровский столик, всегда находящийся под рукой современного петролога.

Из всех достижений Федорова универсальный метод пользуется наибольшей популярностью. Во всех странах студентам-минералогам и петрографам читаются о нем специальные курсы. Детальному изложению его посвящена трехтомная классическая монография «Универсальный метод Федорова», принадлежащая перу ученика и помощника Евграфа Степановича, профессора минералогии Горного института В. В. Никитина (1867—1942). В 1953 г. Издательство Академии наук выпустило фундаментальный сборник под заглавием «Универсальный столик Е. С. Федорова».

Кроме русских авторов, ряд иностранных ученых (Дюпарк, Рейнхард, Берек, Эммонс, Кандель-Вила и др.) опубликовал специальные исследования и руководства по федоровскому методу. Широкое распространение этого метода во всем мире красноречивее всего говорит о его значении.

Более семидесяти лет прошло со дня открытия теодолитного метода, однако важность его, как и значение двух сконструированных Федоровым приборов, непрерывно возрастает. Новейшие течения в петрографии, связывающие динамику земной коры с закономерным распределением кристаллов в горных породах, получили распространение благодаря применению федоровского столика. Вы-

сокое развитие гониометрических методов определения вещества кристаллов было бы немыслимо без федоровского гониометра. В последнее время к федоровским приборам все чаще начинают прибегать физики и химики, желающие наиболее быстрым и простым путем определить состав кристаллов. Теодолитный метод, гениальный по своей простоте и изяществу, сделал широко популярным имя Федорова среди кристаллографов, петрографов, минералогов, химиков и физиков всего мира.



ТУРЬИНСКИЕ РУДНИКИ. КАФЕДРА ГЕОЛОГИИ В МОСКОВСКОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ИНСТИТУТЕ

С тяжелым чувством покидал Евграф Степанович Петербург. Казалось, что отъезд навсегда оторвет его от любимой науки, превратит в рядового горного инженера. Вот как он сам писал об этом в одной из своих позднейших статей: «В 1894 году, в год 25-летия моей действительной научной деятельности, я за неспособностью был вытеснен из Петербурга и пребывал (или, как писали иностранные коллеги, был в ссылке) в Турьинских рудниках».¹ К счастью, невеселые предчувствия Федорова не оправдались. Среди величественной уральской природы, вдали от городской сутолоки, в стороне от интриг он нашел полную возможность продолжать наряду с геологическими работами и свои теоретические исследования. Известную роль в этом отношении сыграли и материальная обеспеченность, и то внимание и забота, которыми Евграф Степанович был здесь окружен.

До приезда Федорова дела округа были в весьма плачевном состоянии. Часть медных рудников работала впустую, заводы давали одни лишь убытки. По словам жены Евграфа Степановича, «он ехал спасать все это, как знаменитый доктор к опасному больному».² Все, с чем он здесь встретился: необходимость поднять приходившее в упадок производство, живое и интересное дело, так отличавшееся от сухой чиновничьей службы, — все это не могло не увлечь ученого.

Тщательный осмотр рудников и вдумчивый анализ архивных материалов привели Евграфа Степановича к убе-

¹ Е. С. Федоров. Первое констатирование опытным путем асимметричной правильной системы. Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 1, стр. 56.

² Л. В. Федорова. Наши будни, горести и радости. Воспоминания. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 2, № 47.

ждению о связи медного оруденения с особыми авгито-гранатовыми породами. Это открытие блестяще оправдалось на практике и привело к подлинному возрождению Турьинских рудников.

Слава «авгито-гранатовой теории» вместе с именем ее создателя прогремела по всему Уралу. Газеты и журналы превозносили федоровское учение. Горные инженеры с успехом применяли его при разведочных работах в разных местах Урала.

Кроме того, Е. С. Федоров обратил пристальное внимание на местные месторождения железных руд, золота, хромитов, марганца, бурых углей, огнеупорных материалов.

К своей работе ученый привлек даровитого молодого инженера В. В. Никитина, ставшего впоследствии известным профессором минералогии и популяризатором федоровского теодолитного метода в петрографии.

Вместе со своим помощником Евграф Степанович занялся геологическим и топографическим картированием округа и научным описанием минералов, горных пород и месторождений полезных ископаемых.

Изобретенный им способ микроскопического изучения минералов Евграф Степанович применил для нужд горной промышленности. Универсальный оптический метод, позволяющий анализировать горные породы, был положен в основу детальной геологической съемки Богословского округа. На основании полученных данных была составлена подробнейшая геологическая карта, проведено систематическое и углубленное описание района.

Одним из крупнейших достижений Евграфа Степановича было основание при Турьинском руднике Геологического музея, существующего до сих пор. В этом учреждении были помещены все имеющиеся материалы о геологическом строении Богословского округа; здесь же находилась библиотека, шлифовальная мастерская, два петрографических микроскопа с федоровскими универсальными столиками, несколько горных компасов и пр. Коллекция образцов горных пород, имевшаяся тут, состояла из 80 тысяч экспонатов, не считая множества рудных штуфов. Главное сокровище музея представляла колоссальная карта района в масштабе 1 : 1000, сложенная из 197 отдельных листов; каждый из них занимал площадь в 0.5 м².

Федоровский музей сыграл большую роль в развитии горной промышленности округа.

Приведем отрывок из статьи Б. М. Романова, наглядно обрисовывающий особенности Федоровского музея и сыгранную им роль.

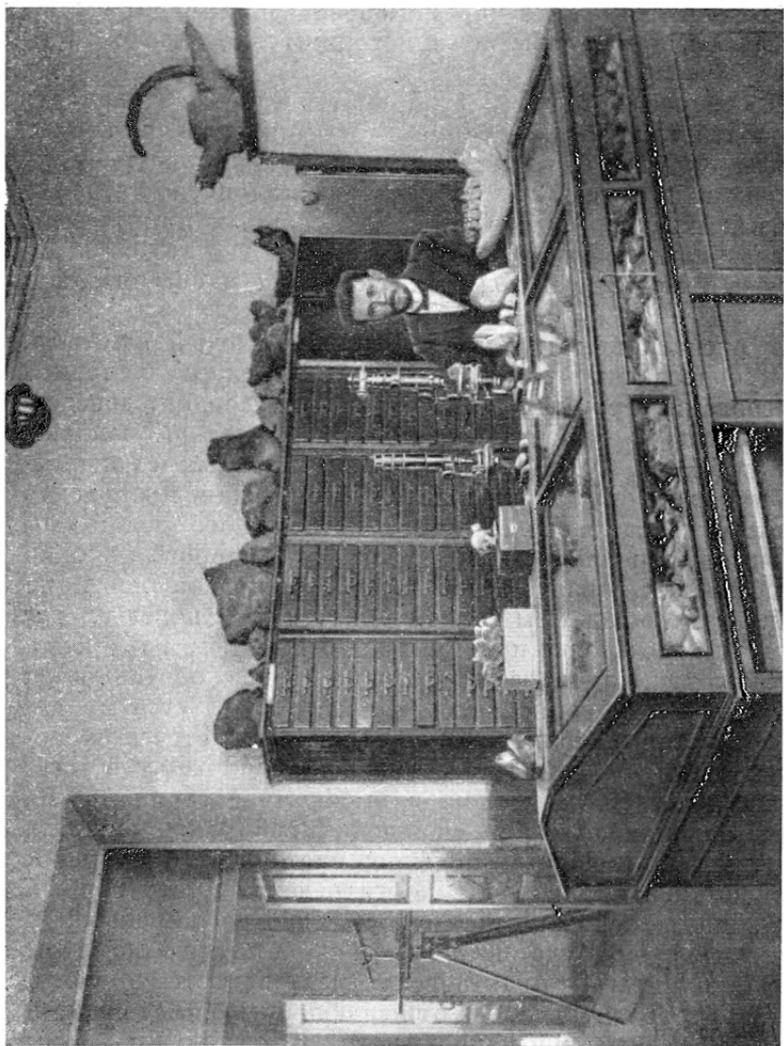
«Это был музей особого типа — без парадных витрин, сверкающих разнообразием форм и красок минерального мира. В десятках закрытых шкафов он хранил в себе десятки тысяч шлифов, точно привязанных к определенным точкам территории округа, многочисленным рудникам и разведкам. Значение хранения этого каменного материала сказалось уже в послереволюционный период. По образцам музея, например, было открыто крупнейшее месторождение бокситов. . . До сих пор в Федоровском геологическом музее в г. Краснотурьинске хранятся как реликвии первые модели универсального столика Е. С. Федорова, коллекции шлифов оригинальной формы на круглых предметных стеклах, стереографические федоровские сетки с определением оптических констант минералов».³

Свой музей Евграф Степанович сделал центром геологической службы округа. Сюда со всех рудников регулярно поступали рапорты, зарисовки, образцы встреченных пород. Из музея же шли указания о направлении горных работ, основанные на научном изучении поступивших материалов.

Все эти начинания Евграфа Степановича могут служить прекрасным примером подхода большого ученого к вопросам практики.

В «Воспоминаниях» Людмилы Васильевны Федоровой не раз отмечается увлечение, с которым Евграф Степанович работал на Турьинских рудниках. Он горячо любил Урал, его не пугали ни жестокие морозы, ни суровая природа. Не останавливаясь перед длительными переездами, он лично присутствовал на топографических и геологических съемках, спускался в шахты, внимательно просматривал отходы руды. «Еду на свидание со своей любимой гранатовой породой», — шутил он, выезжая из дома.

³ Б. М. Романов. Роль Е. С. Федорова в истории геологического исследования Урала. Тр. Горно-геолог. инст., вып. 26, Минералог. сб., № 3, Свердловск, 1955, стр. 10.



Федоровский геологический музей в Турьинских рудниках.

Геологические изыскания, проведенные Е. С. Федоровым вместе с В. В. Никитиным, были суммированы в обширной монографии «Богословский горный округ» (1901 г.). Приложенная к книге карта с обозначениями пород явилась выдающимся событием в истории геологического изучения Урала.

В специальной главе этой книги Евграф Степанович подробнейшим образом описывает минералы и горные породы округа. В конце описания приводится таблица, содержащая свыше 200 определений кальциево-натровых полевых шпатов (плаггиоклазов), сделанных при помощи универсального федоровского метода. И все это осуществилось отнюдь не при легких условиях и обстоятельствах.

В предисловии к монографии сам ученый отмечает, что произведенные работы в суровых таежных условиях потребовали огромных затрат труда и «усердия, доведенного почти до самоотвержения». В докладной записке, поданной Е. С. Федоровым и В. Ю. Никитиным по окончании работ в округе, находится следующая прекрасная характеристика завершенного ими большого дела: «Мы положили основание делу, развитие которого должно способствовать процветанию горной промышленности не только в Богословском горном округе, но и повсюду, где владельцы достаточно проникнуты убеждением, из-за которого мы принялись за исполнение наших обязанностей в округе. Мы не сомневаемся в том, что найдутся многие другие, которые по разным углам нашего отечества последуют нашему примеру и еще более укоренят в мире горных деятелей убеждение в высоком значении чистой науки. Заканчивая теперь свое дело и собираясь покидать округ, мы закликаем Правление, настоящих и будущих собственников округа — не портить дела. Пусть Горный музей, нами основанный и значительно расширенный, и на будущее время будет источником света науки в округе».⁴

Однако кипучая практическая деятельность не могла целиком оторвать Федорова от излюбленных исследований по теоретической кристаллографии. К сожалению, этим занятиям он мог уделять лишь немногие свободные от работы часы. Но зато в такие часы Федоров весь отдавался своей любимой науке.

⁴ Горн. журн., 1898, т. IV, № 11, стр. 244.

«Теперь я буду отдыхать от забот и наслаждаться вполне», — говаривал он, садясь за письменный стол. Ни возня детей, шумевших в соседних комнатах, ничто на свете не могло в такие минуты прервать поток увлекавших его мыслей.

Само собой разумеется, что эти мысли не оставляли ученого и во время его повседневных геологических работ, и в те редкие праздничные дни, когда он позволял себе отдыхать в кругу своей семьи.

«На свежей траве вокруг скатертей разостланы ковры, — рассказывает об одном из семейных пикников Людмила Васильевна, — звенят тарелки и ложки, дети шумно собираются на зов старших. Между тем, в стороне, пощипывая бородку, похаживает взад и вперед Евграф Степанович. Им уже, должно быть, завладели его идеи и он неудержимо унесся вслед за ними. Не заставить его вернуться к насущной потребности еды, к разостланным вокруг скатертей коврам».⁵

Несмотря на напряженную работу, жизнь в Богословском округе благотворно отразилась на научной деятельности Федорова. Здесь он закончил свои основные труды по теории кристаллической структуры и внес новые усовершенствования в универсальный метод в применении к оптическим исследованиям. За этой работой сотрудники по музею не раз заставляли его по утрам сидящим в той же позе, которую он принял еще с вечера. В этот же период Евграф Степанович преподавал геологический цикл наук в Турьинском горном училище.

Пребывание Федорова в Богословском округе продолжалось сравнительно недолго. В своей автобиографии Е. С. Федоров писал: «Но был у меня истинный друг — Иван Васильевич Мушкетов, по возрасту немного старше меня, но по положению стоявший неизмеримо выше и в отношении меня как бы находившийся в положении покровителя».⁶ Позднее, уже после смерти Мушкетова, Евграф Степанович так вспоминал о своем старшем друге: «Все его неопределимые заслуги перед наукой тонут в море реаль-

⁵ Л. В. Федорова. Воспоминания.

⁶ Е. С. Федоров. И[мператорская] П[етербургская] Академия наук. Автобиографические записки, воспоминания и характеристики. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 1, № 22.

ного добра, сделанного им людям и своей Родине как человеком и гражданином».⁷

Выдающийся геолог и популярный профессор, Иван Васильевич Мушкетов (1850—1902) занимал в те годы кафедру в Горном институте. Он оказывал помощь многим, пользуясь своей известностью и авторитетом. В отличие от большинства геологов и минералогов, Мушкетов был в числе немногих ученых, сразу же оценивших исключительные дарования Е. С. Федорова. «Живя в Турьинских рудниках, — пишет Евграф Степанович, — я и не подозревал, что он хлопочет о предоставлении мне кафедры в новооткрываемом Московском сельскохозяйственном институте».⁸ Дошла до нас интересная переписка между двумя учеными, относящаяся к этому времени.

Письма Е. С. Федорова к И. В. Мушкетову ярко характеризуют тяжелые условия научной работы в дореволюционной России. В ответ на предложение занять кафедру в Сельскохозяйственном институте, Евграф Степанович с горечью писал: «Как бы то ни было, мои силы пропали даром; теперь я уже становлюсь инвалидом и никакие стечения обстоятельств не возвратят мне прежней ясности, бодрости и энергии. Мой возраст позволяет видеть правильную внутреннюю собственную оценку и я сознаю, что если бы хоть лет десять тому назад был поставлен у дела преподавания науки, то в России создалась бы школа кристаллографии, опередившая все другие страны, и к нам бы приезжали учиться».⁹

И все же после долгих колебаний Е. С. Федоров решил стать профессором геологии в Московском сельскохозяйственном институте. Как-никак, а все же, наконец, осуществилась давнишняя мечта ученого о своей кафедре.

К сожалению, кафедра, которую он получил, была в институте, в котором не только кристаллография и минералогия, но даже геология считалась предметом второстепенным.

И тем не менее переезд в Москву безусловно знаменует наступление перелома в жизни Федорова. На второй план

⁷ Письма Е. С. Федорова к И. В. Мушкетову. Публикация Н. Н. Бархатовой и К. И. Шафрановского. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 171—226.

⁸ Е. С. Федоров. Автобиографические записки.

⁹ Письма Е. С. Федорова к И. В. Мушкетову, стр. 171.

отодвинулись заботы о зарботке, осуществились давнишние мечты об организации своей лаборатории и своего минералогического кабинета. Благоприятно действовало и то уважение и сочувствие, с которым встретили своего выдающегося товарища профессора и преподаватели сельскохозяйственного института. Не могло не привлекать Федорова также и славное прошлое этого учебного заведения. Ведь всего за несколько лет до этого институт был преобразован из знаменитой Петровско-Разумовской академии, являвшейся центром революционно настроенного студенчества и передовой профессуры.

Евграф Степанович знал, что совсем незадолго до его приезда здесь смело прозвучала с кафедры ботаники вдохновенная речь К. А. Тимирязева, великого ученого и борца за свободу. В 1892 г. Академия была расформирована и превращена в Сельскохозяйственный институт. Однако изгнание «неблагонадежных» профессоров и «непокорных» студентов не могло поколебать славных традиций этого учебного заведения, где по-прежнему в подполье продолжала бурлить революционно настроенная молодежь, к которой примыкала и лучшая часть профессуры.

Десять лет, которые Евграф Степанович провел в Петровско-Разумовском под Москвой, он считал счастливейшим временем своей жизни. Сравнительно небольшая педагогическая нагрузка, состоявшая из чтения кратких курсов по геологии, минералогии и петрографии, давала Федорову полную возможность целиком отдаться научной работе. Не случайно, что именно к этому времени относится серия его больших работ по теоретической кристаллографии и универсальному методу.

Расцвету творческой деятельности ученого безусловно способствовала и тихая жизнь в загородном доме института, расположенном среди прекрасного парка. Один из бывших воспитанников этого учебного заведения, знаменитый писатель В. Г. Короленко, вспоминает в «Истории моего современника» Петровско-Разумовское: «В этом месте моих воспоминаний на меня точно веет струя свежего воздуха, и прежде всего в прямом, не переносном смысле. Уже от Москвы дорога пролегла лесными аллеями с запахом свежего снега и сосны. Пустые дачки среди леса, потом красивое здание Академии, церковка, парк, плотина, пруд под снегом в одну сторону, открытые дали

в другую. . . С этого времени начинается для меня новый период жизни и новое настроение».¹⁰

Эти строки, написанные с такой трогательной теплотой, можно было бы отнести и к жизни Е. С. Федорова.

Окна его профессорской квартиры выходили в густые заросли парка. По вечерам, после занятий, Евграф Степанович любил играть на рояле в четыре руки с одной из своих дочерей.

В летнее каникулярное время Федоров обычно уезжал на Урал, «на свидание со своей любимой гранатовой породой», где руководил геологическими исследованиями Богословского округа вплоть до 1899 г. Вслед за уральскими рудниками он изучал рудные месторождения Кедабека и некоторых других районов Закавказья. И тут его работы увенчались успехом. На основе полученных им выводов обнаружилась возможность расширения рудного дела в одном из месторождений, которое, казалось, близилось к полной выработке.

К этому же периоду относится и начало широкого признания научных заслуг Федорова. Мы уже упоминали о том, как в целях сохранения приоритета русской науки в вопросах кристаллографии Евграф Степанович предпринял печатание своих исследований в иностранных журналах.

Вот как описывает он сам впечатления, которые произвели его работы за границей: «Результат получился весьма странный. Едва я приступил к опубликованию серии своих работ, немедленно же после опубликования той части, которая была признана не заслуживающей внимания в нашей Академии, Баварская академия избрала меня своим членом-корреспондентом».¹¹

Большую роль в распространении и популяризации федоровских достижений за границей сыграл крупнейший немецкий кристаллограф П. Грот (1843—1927). Выше уже рассказывалось о том, как Евграф Степанович стал публиковать статьи в его «Кристаллографическом журнале». Приводились также и отзывы Грота о трудах Е. С. Федорова.

До конца своей жизни немецкий кристаллограф оставался горячим поклонником русского ученого. В статье

¹⁰ В. Г. Короленко. История моего современника.

¹¹ Е. С. Федоров. Автобиографические записки.

«Кристаллографический журнал за свое первое пятидесятилетие» П. Грот писал о смерти Е. С. Федорова: «Трагическим обстоятельством явилось то, что оба величайших мыслителя в области нашей науки за последние пятьдесят лет — Малляр и Федоров, из которых последний являлся более многогранным гением, были преждевременно похищены смертью».¹² Сохранившаяся переписка Е. С. Федорова с П. Гротом охватывает период в 25 лет — с 1891 по 1915 г. Из нее мы видим, какое большое влияние оказал Е. С. Федоров на творчество самого Грота и на развитие зарубежной кристаллографии. Федоровско-Гротовская номенклатура кристаллографических форм до сих пор имеет самое широкое распространение в мире.

Избрание Федорова в 1896 г. в Баварскую академию по представлению П. Грота и Л. Зонке подчеркивало его первенствующую роль в кристаллографии.

В 1898 г., во время зимних каникул, Евграф Степанович отправился за границу. Иностранцы минералогии и кристаллографии встретили русского ученого с глубоким интересом и уважением. Эта поездка и в особенности широкое признание его заслуг несколько сгладили воспоминания о пережитых годах научного одиночества.

Нельзя не привести нескольких характерных цитат из автобиографии Федорова, рассказывающих об его заграничном путешествии.

В Берлине ученому устроил торжественную встречу в Музее, а затем и дома известный немецкий минералог и кристаллограф, академик К. Клейн (1842—1907). «Он говорил, — пишет Евграф Степанович, — что считает за честь в моем лице приветствовать не только первого минералога в России, но, по его личному мнению, и первого представителя этой специальности во всем мире. . . В послеобеденной беседе Клейн опять перешел на личную тему, и особенно подчеркнул поговорку, что никакой пророк не признается в своем отечестве. Его возмущало, что в России высший авторитет по минералогическим наукам занимает кафедру в Сельскохозяйственном институте».¹³

«Но особенно встреча Грота в Мюнхене отличалась исключительной сердечностью», — продолжает свой рас-

¹² Переписка Е. С. Федорова с П. Гротом. Публикация И. И. Шафрановского. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 196.

¹³ Е. С. Федоров. Автобиографические записки.

«сказ Евграф Степанович. — «Встреча была с объятиями и поцелуями. Он не только познакомил меня с академическим минералогическим музеем, но и взял на себя неблагодарную роль чичероне, показывая все достопримечательности Мюнхена».¹⁴

С удовольствием описывает ученый праздничную встречу нового года в кругу семьи Грота и их совместную поездку в живописные окрестности города. Надолго запомнились ему красивый вид на обрамленное лесом озеро, снежные поляны и дикие газели, совершенно не пугавшиеся людей.

Свое описание путешествия в Германию Евграф Степанович заканчивает следующими словами: «Эта кратковременная поездка, которую я даже предпринял неохотно и которая меня наперед тяготила, как отвлекающая от прямых занятий, однако, чувствительно не прошла даром. Теперь стало очевидным, что те два с половиной десятилетия с избытком, которые целиком и по возможности без остатка я посвятил науке, были потрачены не напрасно».¹⁵

Творчество Федорова не могло не привлечь к себе внимания учащейся молодежи. И действительно, вскоре кафедра геологии и минералогии Московского сельскохозяйственного института, имевшая до тех пор лишь подсобное значение, стала местом паломничества молодых минералогов и кристаллографов не только Московского университета, но и студентов Петербургского горного института и университета. Многие из этих молодых людей впоследствии заняли видное место в науке.

К этому же времени относится знакомство и дружеская близость Е. С. Федорова с нашим замечательным минералогом, а впоследствии прославленным геохимиком и биогеохимиком — Владимиром Ивановичем Вернадским (1863—1945).

Первая встреча двух ученых произошла в 1895 г., когда Е. С. Федоров переехал в Москву, где занял пост профессора геологии Сельскохозяйственного института. В. И. Вернадский в это время заведывал минералогическим кабинетом Московского университета и читал общий курс минералогии и кристаллографии в должности при-

¹⁴ Там же.

¹⁵ Там же.



Е. С. Федоров
(1898 г.).

ват-доцента (профессором он был избран лишь в 1898 г.). Сохранилось несколько писем Федорова к Вернадскому, из которых видно, как крепко содружество между обоими учеными.¹⁶ Владимир Иванович направлял в федоровскую лабораторию своих учеников, ставших впоследствии видными минералогами — Я. В. Самойлова, Д. Н. Артемьева, а позднее и А. Е. Ферсмана.

Евграф Степанович делился с Вернадским своими научными планами. Он переслал ему корректуру своего курса кристаллографии и дал высокую оценку диссертации Владимира Ивановича «Явления скольжения кристаллического вещества».

24 августа 1901 г. по представлению В. И. Вернадского Московский университет присудил Е. С. Федорову почетную степень доктора минералогии.

В своем представлении Вернадский характеризовал Е. С. Федорова как «редкий в истории науки тип исследователя, оригинального, с огромной инициативой и изобретательностью, который идет всюду новыми своими путями и отличается редкой научной производительностью работы. Я считаю его самым выдающимся кристаллографом в Европе и Америке, одним из учителей нашей науки».¹⁷

В ответ на избрание Евграф Степанович написал В. И. Вернадскому замечательное письмо, несколько цитат из которого приводится ниже:

«Многоуважаемый Владимир Иванович! С того момента, как Вы приняли на себя инициативу почтить мои посильные научные труды высшей ученой степенью, Вы заставили меня смотреть на Вас, как на ближайшего товарища по науке, как на союзника в проведении новых научных идей. Как раз в настоящую минуту мы вступаем в новый фазис изучения кристаллических веществ, начинаем разбираться в расположении частиц не каких-нибудь отдельных представителей минерального царства, но в их массе, по крайней мере всех тех, кристаллы которых изучены

¹⁶ Н. М. Раскин и И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров и В. И. Вернадский. По материалам Архива Академии наук СССР. Сб. «Очерки по истории геологических знаний», № 8, М., 1959, стр. 165—176.

¹⁷ М. С. Шустерова. Обзор документальных материалов Центрального государственного архива СССР в Ленинграде о Е. С. Федорове. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 253—255.

с некоторой обстоятельностью. . . Я счастлив и горжусь тем, что теперь мы уже не слепо следуем за западно-европейскими авторитетами, но и сами становимся способными пролагать новые пути. Шаг, делаемый теперь, так глубоко затрагивает самые корни кристаллографии, что, приступая к новому изданию Курса, я увидел неизбежность переделки его почти заново. Предыдущее издание для меня уже что-то очень устаревшее, истинное руководство прошлого века, безвозвратно минувшего.

«Не дожидаясь, пока оно выйдет в свет, я счел долгом Вам как союзнику по науке послать листы в последней корректуре, так как надеюсь, что кое-что может Вам пригодиться в цикле Ваших лекций» (сентябрь 1901 г.).

Неожиданным диссонансом после этого прекрасного письма звучит отзыв Евграфа Степановича, написанный уже в Петербурге, около 1905 г. В нем подвергается резкой критике замысел В. И. Вернадского создать «Опыт описательной минералогии».

Эту несправедливую критику можно отчасти объяснить тем, что Е. С. Федоров был введен в заблуждение самим названием будущей книги. Мы уже знаем, что Евграф Степанович в течение всей своей научной деятельности вел борьбу со старым направлением в науке, ограничивавшимся формальным описанием минералов без всяких попыток обобщить и проникнуть в сущность найденных фактов. Однако В. И. Вернадский вкладывал совершенно иное содержание в свою «Описательную минералогию». Основной задачей этого классического труда он считал пересмотр минералов с точки зрения химических процессов, происходящих в земле, и создание полной топографической минералогии в России.

Владимир Иванович очень болезненно пережил резкий тон федоровского отзыва. С удовлетворением следует, однако, отметить, что это письмо не повлияло на его отношение к творчеству гениального кристаллографа. Уже после революции Е. С. Федоров был по настоянию В. И. Вернадского избран в советскую обновленную Академию наук.

В 1940 г. Владимир Иванович писал: «Научное значение Е. С. Федорова недостаточно сознается в нашей стране. Имя его должно стать для нашего времени рядом с именами

Д. И. Менделеева и И. П. Павлова, его старших современников». ¹⁸

Растущая научная известность Федорова не могла в конце концов не отразиться и на его официальном положении. В 1896 г. Петербургский горный институт пригласил его читать курс лекций вместо оставившего педагогическую деятельность профессора П. В. Еремеева. Евграф Степанович с радостью принял это предложение. Наконец-то он получил возможность выступать в аудиториях этого столь близкого ему учебного заведения, к которому до конца своих дней он питал особую симпатию! Вместе с тем ему не хотелось бросать занятия и в Сельскохозяйственном институте, где после стольких лет лишений и неудач он впервые нашел обстановку, позволявшую ему спокойно отдаваться научной работе. Поэтому Федоров принял решение вести преподавание одновременно и в том и в другом институте и в течение 1896—1900 гг. два раза в неделю ездил для этого из Москвы в Петербург.

В связи с этими поездками железнодорожная администрация согласилась даже ввести специальные остановки курьерского поезда на платформе Петровско-Разумовского, где садился Евграф Степанович.

Эта подробность несомненно свидетельствует о возросшей популярности московского профессора. Громкая известность Е. С. Федорова среди зарубежных ученых, интерес к его открытиям со стороны молодых русских исследователей и студенчества не могли не обратить на себя внимания, и в 1901 г. Академия наук сочла своим долгом снова выставить Федорова кандидатом в действительные члены Академии.

¹⁸ В. И. Вернадский. Проблемы биогеохимии. 4. О правизне и левизне. Изд. АН СССР, М., 1946, стр. 6.

Е. С. ФЕДОРОВ И ИМПЕРАТОРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

История отношений Федорова с императорской Академией наук настолько характерна для того времени, что на ней следует остановиться подробнее.

Мы уже говорили, что в 1893 г. кандидатура Евграфа Степановича была забаллотирована так называемой «немецкой» академической партией. К 1901 г. позиции этой реакционной партии значительно ослабли. В состав Академии вошел ряд крупнейших русских ученых. Но даже несмотря на это, старые академические традиции продолжали упорно сохраняться. Нельзя забывать, что Петербургская Академия наук была императорской академией. И именно этим прежде всего объясняются столкновения, которые имели место между прогрессивно настроенным Федоровым и реакционными учеными, возглавлявшими это ведущее научное учреждение страны. Несколько передовых академиков (Н. Н. Бекетов, Ф. Б. Шмидт, А. П. Карпинский, Ф. Н. Чернышев), выдвигая его кандидатуру, написали специальную докладную записку о научных заслугах Федорова. Однако при чтении ее бросается в глаза, что многое в трудах Евграфа Степановича осталось ими не понятым и недооцененным.

Вот несколько отрывков из этого документа, приложенного к протоколу заседания Физико-математического отделения Академии от 13 декабря 1900 г.

В начале записки безоговорочно признается значение научных трудов Федорова:

«Обсудив вопрос о замещении вакансии по минералогии, большинство членов назначенной с этой целью Комиссии пришло к заключению, что среди современных русских ученых наибольшее влияние на развитие этой науки оказано трудами профессора Сельскохозяйственного

института в Москве Евграфа Степановича Федорова».¹

Далее следует разбор главнейших трудов Евграфа Степановича и указание на признание его приоритета за границей. Так, например, отмечается, что новая кристаллографическая номенклатура, разработанная Федоровым, принята Гротом, Либишем и другими иностранными кристаллографами. То же самое указывается и в отношении универсального метода:

«Идеи г. Федорова послужили к проектированию нескольких заграничными учеными универсальных гониометров, но по типу первого инструмента русского минералога, приготовленного в Петербурге на средства императорского Минералогического общества. . .

«Им был предложен и впервые изготовлен в Петербурге на средства Геологического комитета универсальный столик, позволяющий в минеральных составных частях горных пород делать определения оптических их элементов с такой точностью, о достижении которой ранее нельзя было предполагать. Новый метод является теперь общепринятым, и в иностранных оптических заведениях готовятся несколько систем столиков Федорова, кроме подражательных столиков иностранных минералогов».²

После сказанного тем более странно звучат в заключении записки слова о том, что федоровские достижения являются крайне сложными, что они могут казаться излишними для неспециалистов, и т. п. Все это, а также ссылка на авторитет иностранной академии, избравшей Евграфа Степановича своим членом, показывает, что составители записки не до конца осознавали огромное значение трудов Федорова. Особенно подчеркивается в ней важность методов, разработанных Евграфом Степановичем, тогда как о его теоретических достижениях говорится не только с осторожностью, но как будто даже с оттенком неуверенности.

В заключение авторы записки пишут:

«Имя г. Федорова пользуется широкой известностью. Без преувеличения можно сказать, что не существует

¹ И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров и Академия наук. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., т. 10, Изд. АН СССР, М.—Л., 1956, стр. 36.

² Там же, стр. 37.

лица, занимающегося минералогическими и петрографическими вопросами, которому идеи Федорова и предложенные им методы были неизвестны. Работы этого ученого в области теоретической кристаллографии, основанные на методах, труднодоступных для большинства минералогов, могут казаться некоторым из них усложняющими задачи кристаллографии, а лицам, незнакомым с этим предметом, — излишними, но нельзя не указать, что значительная часть результатов, полученных Федоровым, сделалась теперь общепризнанной и достигнута другими учеными иными путями. Именно эти теоретические работы послужили началом известности г. Федорова за пределами нашего отечества и основанием к избранию его, между прочим, в члены Мюнхенской академии. Но если бы эти работы вовсе не существовали, то уже одни предложенные им новые методы исследования минералов и произведенные на основании их наблюдения были бы достаточными для вступления его в среду нашей Академии, и мы при настоящих обстоятельствах не считаем возможным делать какие-либо представления о замещении вакансии по минералогии, не остановившись прежде всего на профессоре Федорове».³

5 мая 1901 г. Федоров был избран адъюнктом Академии по кафедре минералогии. Следует отметить, что сам Евграф Степанович считал звание адъюнкта не соответствующим своему научному значению. В самом деле, адъюнктами обычно выбирались ученые, лишь только начинавшие свою научную деятельность. По отношению к 48-летнему профессору, имевшему уже мировую известность, звание это было не только неподходящим, но и обидным. Назначение Федорова адъюнктом императорской Академии можно было, пожалуй, сравнить с камер-юнкерством Пушкина. И тем не менее Евграф Степанович энергично принялся за работу, в частности, за проект создания в Академии Минералогического института.

«Первая и насущная потребность в деле повышения уровня минералогических знаний в России есть устройство Минералогического института при Академии как центральном учреждении, единственный смысл существования которого — приходить на помощь занимающимся наукой, — писал он по этому поводу. — Осмелюсь обра-

³ Там же, стр. 39.

тить внимание Отделения, что расходы, сопряжённые с устройством Минералогического института, в коем можно было бы разрабатывать науку по новейшим научным способам, должны быть довольно значительны. Ведь современный минералог пользуется дорогими методами, разработанными геодезистами, физиками и химиками для геометрического, физического и химического исследования минералов, и притом имеется немало методов, практикующихся почти только в минералогических институтах.

«Кроме того, от меня, главная обязанность которого состоит в разработке науки, ожидается не только повторение работ, произведенных другими специалистами. От меня ожидается также и осуществление тех научных методов, идея которых изложена в моих сочинениях, но которые не могли быть мною использованы за отсутствием средств. Некоторые из этих методов требуют крупных затрат. Так, для проверки закона расширения кристаллов от нагревания, закона, выведенного мною из наблюдений, произведенных другими исследователями, по опубликованному мною методу, простейшему в своем выполнении, потребуется расход в несколько тысяч рублей.

«В лежащих пока без движения моих личных научных материалах заключается ряд новых разработанных методов, весьма важных для точного понимания предметов минерального царства.

«Весьма возможно, что я один не буду в состоянии справиться с разработкою всех тем, накопленных в моих материалах. Но я рассчитываю в этом отношении на содействие нескольких молодых ученых, почему и устройство Минералогического института при Академии должно быть так рассчитано, чтобы в нем одновременно несколько ученых могли производить разнообразные учёные исследования».⁴

Евграф Степанович просил Отделение отыскать подходящее для Минералогического института помещение и ассигновать кредит для приобретения оборудования и приборов.

Мысль о таком академическом институте, однако, тогда не была осуществлена. Лишь после Великой Октябрьской социалистической революции идея Федорова нашла свое воплощение в создании крупных научно-исследова-

⁴ Там же, стр. 41—42.

тельских институтов, которым предоставлены все возможности для успешного развития различных областей науки в нашей стране.

Совсем по-другому расценивалась роль Академии в до-революционное время. Не заинтересованное в развитии отечественной науки, преклонявшееся перед всем иностранным, царское правительство рассматривало Академию как своего рода музей древностей, куда нередко выбирались самые «почтенные» и, конечно, самые благонамеренные, с его точки зрения, ученые.

Не случайно во главе Академии тогда стоял ближайший родственник царя — великий князь Константин Константинович, печатавший слащавые стихи под псевдонимом «К. Р.» и, очевидно, в связи с этим выбранный на пост президента Академии.

Вот почему проект Федорова о создании Минералогического института не встретил никакой поддержки в академических верхах и вскоре был похоронен в грудах канцелярских бумаг.

Все это очень подействовало на Евграфа Степановича, и он возбудил ходатайство об оставлении его в Москве. После длительных переговоров из Академии пришла, наконец, долгожданная бумага: адъюнкту Федорову разрешалось временно продолжать свою профессорскую деятельность в Московском сельскохозяйственном институте. В то же время Евграф Степанович продолжал борьбу за осуществление своего проекта. «Без Минералогического института мое дальнейшее пребывание в Академии невысказано», — писал он.

Однако его повторное заявление об организации Минералогического института также осталось без последствий. А поданная им смета на оборудование лаборатории была отклонена ввиду того, что будто бы превышала средства, имеющиеся у Академии.

«Устройство больших научных институтов весьма желательно, но вопрос об основании этих учреждений, нигде еще при Академиях не существующих, требует всестороннего обсуждения», — читаем мы в протоколе заседания, на котором рассматривалось предложение Федорова.

Возмущенный всей этой волокитой Евграф Степанович подал заявление о своем уходе из Академии.

К этому же времени относится его выступление в газете «Русские Ведомости», ярко обрисовывающее взгляды

ученого на роль Академии в деле развития русской науки. «Наука, — писал Е. С. Федоров, — есть растение, не получающее пышного развития в затхлой атмосфере, не согреваемой солнечными лучами любви к отечеству и истине, не освежаемой открытым и свободным ветром независимого слова. Пока такие условия существуют, нельзя и ожидать соответствующего способностям русских людей расцвета науки на родной почве».⁵

Широкий резонанс, который мог бы вызвать уход Федорова, был явно нежелателен тогдашним академическим руководителям. В связи с этим непреременный секретарь обратился к Федорову с сообщением об единогласном желании членов Физико-математического отделения сохранить его в своей среде. После некоторых колебаний Е. С. Федоров письменно уведомил, что поданное им прошение об отставке он считает недействительным.

На заседании Физико-математического отделения 22 сентября 1904 г. акад. А. П. Карпинский заявил, что вследствие существования в Московском сельскохозяйственном институте наиболее благоприятной обстановки для научных занятий Е. С. Федорова и отсутствия у Академии специальных средств, необходимых для поездок ученого из Москвы в Петербург, он предлагает ходатайствовать о разрешении Федорову проживать в Москве при сохранении полагающегося ему содержания.

Будучи глубоко принципиальным человеком, Евграф Степанович увидел в ходатайстве о сохранении за ним академического содержания противозаконный и оскорбительный для него акт. Об этом он и сообщил в своем обращении на имя президента Академии наук, требуя, чтобы отпускаемые ему средства были использованы для организации Минералогического института при Академии наук. В конце этого обращения он писал: «Если в течение нескольких месяцев мне удастся собрать средства, необходимые для этого, я присоединю их к сумме, какая могла бы быть отпущенною Академией. Без Минералогического же института мое дальнейшее пребывание в Академии невысказано».⁶

⁵ Е. С. Федоров. Об условиях научной деятельности в нашем отечестве. «Русские ведомости», 1903, № 253.

⁶ И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров и Академия наук, стр. 49.

Близкое по содержанию письмо было им послано акад. А. А. Маркову. После длительного обсуждения этих писем, деятельное участие в котором принял А. П. Карпинский, Е. С. Федоров решил окончательно уйти из Академии. С этой целью 7 января 1905 г. он обратился к президенту Академии со следующим заявлением.

Ваше императорское высочество!

Когда накануне моего выбора в члены-корреспонденты Баварской академии наук, поставленный при своем непреодолимом научном влечении в безвыходное положение, но полный сил, имея весьма неправильное представление об императорской Санкт-Петербургской академии наук, я обратился к ней за помощью, она меня грубо оттолкнула.

Она пожелала привлечь меня в качестве «адъюнта», т. е. начинающего ученого, когда я стал инвалидом. Было так устроено, что, приняв выбор, я остался бы без средств для научных занятий и даже без средств к жизни. Конечно, зная теперь, что такое Академия, я должен был отказаться от этого выбора; но пока еще были остатки сил, мой отказ мог со стороны потомков вызвать справедливый упрек, что я не сделал попытки вынудить Академию оказать помощь делу русского просвещения устройством Минералогического института. Ваше императорское высочество изволили видеть, что моя попытка вызвала со стороны Академии попытку запачкать мое имя, побудив принять участие в противозаконном дележе казенного пирога. Такова пропась в воззрениях, целях, задачах скромных людей науки, подобных мне, и господ академиков, важных представителей нашей бюрократии, той самой бюрократии, которая как своих особо выдающихся представителей выдвигает Биронов, Аракчеевых, Дм. Толстых, Плеве.

Не могу допустить для себя чести принадлежать к этому сословию, почему и решаюсь всепокорнейше просить Ваше императорское высочество дать моему прошению об увольнении из Академии, представленному в мае 1903 года, законный ход и считать меня окончательно выбывшим из Академии, не только без оставления в какой-либо должности при ней,

Но я человек, а человеку свойственно ошибаться. Теперь наступил грозный момент, когда моя ошибка может выразиться самым отчетливым образом.

9 января в толпу мирных русских граждан, шедших под предводительством духовных лиц ради высшей цели всякой науки и культуры — единения народа и власти, — были направлены жерла пушек и ружей, и тысячи убитых и раненых обгарили улицы столицы кровью, пролитой во имя высокой идеи.

О том, что люди шли с самыми мирными и высокими гражданскими целями и были чужды каких-либо грязных намерений, я заключаю из того, что их вели духовные пастыри, своим защитным знаменем выставившие кресты, иконы и хоругви. Значит, народ шел, одухотворяемый религиозным экстазом на дело, которое он считал святым.

Но опять я могу ошибаться; и духовные пастыри, предводительствовавшие народом и шедшие со священными хоругвями, были, быть может, волки в овечьей шкуре, были святотатцами, кощунственно злоупотреблявшими священными эмблемами для своих волчьих целей? Пусть так. В таком случае те, которые приказывали убивать народ, и те, которые действительно его убивали, были истинными героями, рисковавшими больше чем жизнью, рисковавшими вечным позором как нынешнего, так и будущих поколений честных сограждан.

Это легко выяснить. Если как начальствовавшие, так и исполнители их предписаний сознают себя такими чистыми героями, пусть они со всею откровенностью назовут свои имена и опишут свои действия, не скрывая ни своих предписаний, ни своих кровопролитных подвигов. Пусть последний офицер сообщит, на каком месте столицы и каким орудием он убивал людей народа, сколько примерно уничтожил людских жизней и чем он при этом руководствовался. Геройские подвиги не прячутся под спудом строжайшей тайны.

Если же Академия действительно высшая представительница русского ума и чистой истины, то она должна способствовать выяснению перед русскими гражданами этой истины во всей ее неприглядности.

Если ей ясно, что это были не герои, а наемные уличные разбойники, безнаказанно убивавшие мирных и безоружных граждан, добивавшихся возвышеннейших культурных целей, то пусть она открыто выразит это свое убеждение перед всем русским народом.

Если, наоборот, она преступниками считает выступивший народ, а лиц, расстреливавших его, истинными героями, спасавшими отечество, то пусть обратится к ним с воззванием раскрыть всю чистую истину или предпримет вообще что-нибудь действительное для выяснения этой истины.

Если она сделает что-либо подобное, то я перед нею преклонюсь и буду преклоняться даже тогда, когда она выгонит меня с позором из своей среды.

Если бы наша Академия была не противницею чистой истины, а ее истинною и высшею поборницею, то я первый счел бы долгом выступить в ней с этим заявлением.

Прошу принять уверение в моем совершенном почтении.

16 января 1905 года.

Е. Федоров.⁸

Заявление ученого и его изумительно смелое письмо, как и следовало ожидать, не осталось без последствий. На общем собрании Академии наук 3 сентября 1905 г. было решено удовлетворить просьбу Е. С. Федорова об отставке. Евграф Степанович был исключен из адъюнктов императорской Академии наук.

Впоследствии, в 1915 г., ученый описал в «Автобиографических записках» свое отношение к дореволюционной Академии. Глубокая ненависть к затхлой академической рутине и горячее возмущение царившими в то время порядками нашли свое отражение в его «Автобиографических записках». Эта недавно найденная среди архивных материалов рукопись Евграфа Степановича представляет большой исторический интерес и вместе с тем ярко обрисовывает глубоко демократические, революционные настроения ее автора.

⁸ Там же, стр. 22—23.

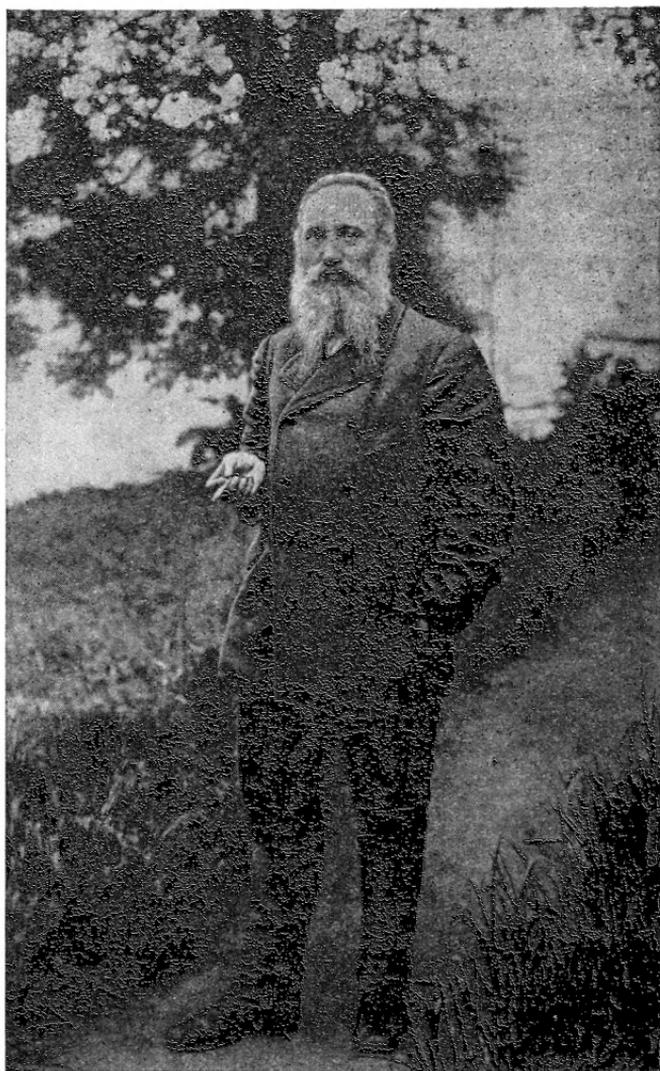
ДИРЕКТОР И ПРОФЕССОР ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Наступил 1905 год. Революционная волна захватила и семью Федоровых. Сын Евграфа Степановича, студент Московского университета, активно выступавший на рабочих собраниях, подвергся аресту, а затем и ссылке. Сам Федоров много раз открыто выступал в защиту революционно настроенных студентов Сельскохозяйственного института и делал все, что в его силах, чтобы оградить их от репрессий царского правительства. Нескольких студентов-революционеров, разыскиваемых полицией, он скрывал у себя на квартире.

Революция 1905 г. всколыхнула не только учащуюся молодежь, но и передовых профессоров. Ряд высших учебных заведений добился даже права самостоятельно выбирать директора. В частности, такое право получил и Петербургский горный институт. Ученый Совет этого института обратился к Евграфу Степановичу с предложением занять должность первого выборного директора:

«Зная Ваши чувства относительно Института и всей корпорации горных инженеров, — говорится в этом обращении, — мы уверены, что Вы не откажетесь отдать часть Ваших сил на служение весьма важному, и даже более — общественному делу. Ваш огромный научный авторитет оградит Вас от мелких неприятностей, связанных с административной деятельностью, а искренняя поддержка со стороны лучших представителей профессорской коллегии облегчит Вам правильное вершение студенческих дел». И далее:

«Кандидатура Ваша вышла из самых чистых и честных побуждений, чуждых всякого личного интереса. Мы питаем к Вам глубокое уважение не только потому, что чтим в Вашем лице именитого ученого, но и потому, что



Е. С. Федоров на Кедабекском месторождении в Закавказье
(1902 г.).

вполне ценим Ваш независимый характер и Ваш благородный образ мыслей».¹

После длительных колебаний Федоров принял сделанное ему предложение. С одной стороны, его привлекала возможность возглавить кафедру минералогии и кристаллографии в своем любимом институте. «Мне, главное, получить кафедру в Горном, чтобы развернуться вовсю», — говорил он. Но, с другой стороны, его пугала предстоящая административная деятельность. «Вероятно, Вам известно, что я всецело отдан науке и что малейшее отклонение от дела, которому я целиком посвятил вот уже 34 года, для меня болезненно. Мыслимо ли при такой идиосинкразии принимать на себя обязанности, которые могут оставить для любимого моего дела лишь очень мало времени!» — писал он одному из профессоров Горного института.²

Время переезда семьи Федоровых в столицу совпало со студенческими волнениями в Петровско-Разумовском. Накануне отъезда из Москвы здание Сельскохозяйственного института было оцеплено солдатами. В студенческих общежитиях и на квартирах профессоров производились обыски. Евграф Степанович категорически заявил, что он ни за что не допустит обыска в своей квартире, «хотя бы это угрожало расстрелом». «Подумайте, сколько труда я положил на укладку своих книг, а они мне все разворуют! Им ведь, бездельникам, нечего делать!» — горячился он.³

Больших трудов стоило его успокоить. К счастью, солдаты ушли, не заглянув в квартиру Федоровых.

Итак, после одиннадцатилетнего пребывания в Москве, семья Евграфа Степановича окончательно переехала в Петербург. Новому директору в самом здании Горного института была отведена огромная квартира из пятнадцати комнат, с окнами, выходящими на Неву.

Сколько раз по той же широкой лестнице, между теми же торжественными колоннами проходил молодой Федоров сперва как студент, а затем как начинающий горный инженер! Сколько неосуществившихся надежд, обид и разочарований было связано в его памяти с этим

¹ И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров. Изд. АН СССР, М.—Л., 1951, стр. 163—164.

² Там же, стр. 164.

³ Л. В. Федорова. Наши будни, горести и радости. Воспоминания. Архив АН СССР, Л., ф. 831, оп. 2, № 47.

зданием! Все так же у входа в институт красовались статуи древнегреческого героя Геркулеса, побеждающего сына земли Антея, и подземного бога Плутона, похищающего Прозерпину. И все же Евграф Степанович с совершенно другим настроением вступал теперь в столь хорошо знакомые ему институтские двери.

Профессора, ученики и почитатели радушно встретили нового директора, своего избранника. С глубоким



Е. С. Федоров в кругу своей семьи
(1900 г.).

вниманием и интересом слушали его не только студенты, но и сотоварищи, считавшие долгом почтить своим присутствием лекции выдающегося ученого.

С первых же дней Евграф Степанович горячо принялся за коренную реформу преподавания и всего строя учебной жизни. Главные усилия он направлял на повышение научного уровня преподносимых студентам дисциплин. При нем предметная система в Горном институте достигла исчерпывающей полноты. Само собой разумеется, что особое внимание обращал он на перестройку программ по минералогии и кристаллографии. В курсах, которые

он читал, Федоров стремился, например, познакомиться слушателей со всеми своими последними достижениями.

Заведование кафедрой минералогии Евграф Степанович поручил своему выдающемуся ученику, профессору В. В. Никитину, работавшему под его руководством еще в Богословском округе. Последний пользовался в кругах специалистов славой крупнейшего знатока федоровского универсального кристаллооптического метода, а также ученого, который подарил науке ряд своих оригинальных приемов по кристаллооптике и создал классический труд «Универсальный метод Федорова».

Для приведения в порядок богатейшего музея Горного института, одного из лучших минералогических собраний в мире, Евграф Степанович выписал из Москвы своего бывшего помощника по Сельскохозяйственному институту, минералога А. Э. Купфера, являвшегося большим знатоком музейного дела.

Вскоре после приезда Федорова в Петербург по его инициативе был основан журнал «Записки Горного института», в котором печатались как труды самого Евграфа Степановича, так и работы его учеников, в том числе и студентов. Высокая требовательность, которая предъявлялась редактором к своему журналу, лучше всего выражена в следующих его словах: «Множество работ заурядного типа, резко обозначая опытность их авторов в обращении с научными приемами, не может идти в сравнение даже с одной научной работой, результатом которой являлось установление нового закона или хотя бы новой точки зрения, нового метода или приемов исследования. Детали всегда останутся деталями, новые же законы или приемы есть зародышевые снежные комья на поле рыхлого снега: значение их со временем прогрессивно возрастает».⁴

Можно было думать, что человек, всецело посвятивший себя науке, окажется малоприспособленным для роли администратора. На самом деле это было не так. Евграф Степанович развил энергичную деятельность и проявил великолепное знание дела. Он привел в порядок расстро-

⁴ Отзыв проф. Е. С. Федорова о кандидатах на замещение кафедры минералогии в Екатеринославском высшем горном училище. Изв. Екатеринославск. высшего горн. училища, 1908, вып. 2, стр. 23.

енное хозяйство Института: добился устройства новой канализации, принял меры для сохранения музея и библиотеки на случай возникновения пожара. По его приказанию в институтском дворе проводилось показательное тушение пожара при участии специально приглашенного брандмейстера.

Нужно заметить, что все эти меры Федорова оказались не напрасными. Возникшие вскоре вследствие несовершенства отопления в библиотеке института два пожара были быстро ликвидированы. Подобных примеров можно привести немало.

Бурные события 1905 г. и последовавшая за ними реакция не могли не отразиться на ходе учебных занятий. Студенческие сходки и демонстрации вызвали жестокие репрессии со стороны правительства, давно уже подозревавшего Федорова не только в сочувствии революционному студенчеству, но и в оказании ему помощи. Об этом, в частности, свидетельствует следующий документ, взятый из архива.

Директор
Горного департамента

Секретно

13 января 1907 г.

№ 43

Его превосходительству Е. С. Федорову.

Милостивый государь Евграф Степанович!

За министра внутренних дел товарищ министра, действительный статский советник Макаров, в письме на имя господина министра торговли и промышленности от 15-го и 16-го декабря минувшего года за №№ 15752 и 15756 сообщил, что, по сведениям, полученным в министерстве внутренних дел, в Горном институте императрицы Екатерины II 22-го ноября 1906 года состоялась сходка студентов, на которой присутствовали посторонние лица и обсуждались вопросы о порядке предстоящих выборов в Государственную думу. Кроме того, в здании названного учебного заведения по вечерам производятся при конспиративной обстановке какие-то

не имеющие научного характера работы, в которых принимают участие посторонние лица, принадлежащие к рабочей среде. Лица эти проходят в Институт по билетам, выдаваемым членам студенческих революционных партий. Контролирующие вход в институтские здания сторожа, подкупленные представителями этой партии, находятся на их стороне и тщательно скрывают все, что делается в стенах Института. По имеющимся указаниям сторожа Горного института внутри здания сего учебного заведения позволяют себе петь революционные песни и произносить оскорбительные слова против священной особы государя императора. К числу наиболее неблагонадежных служащих института принадлежит слесарь лаборатории Филиппов.

Имеются также данные, что во время подобного собрания в названном учебном заведении распространялись преступные прокламации.

Затем 3-го минувшего декабря во вверенном Вам Институте происходила вновь сходка преимущественно студентов других высших учебных заведений и курсисток при участии посторонних лиц и учащихся средних учебных заведений, на каковой сходке между прочим был поставлен на обсуждение вопрос о происхождении религии и во время дебатов высказывались порицания по отношению к христианской вере. Местный пристав, получив сведения о начале названной сходки, немедленно явился на квартиру Вашего превосходительства, чтобы просить Вашего распоряжения о прекращении такого незаконного собрания, но прислугой был извещен об отсутствии Вас из дому. Точно такие же ответы были даны приставу и в квартирах инспектора Института и двух его помощников. Таким образом, чины полиции, не имея возможности лично видеть кого-либо из представителей институтской администрации и убедившись, что сходка устроена с ведома учебного начальства, не пожелавшего принять пристава, решили установить наружное наблюдение. В 11 часов вечера, когда участники сходки начали расходиться, полицией с целью констатировать факт незаконности собрания было задержано несколько лиц, бывших на сходке; в это

время из здания Института вышел на улицу инспектор Никитин, также присутствовавший на сходке, к которому и было обращено требование полиции о немедленном удалении остальных участников сходки. В момент задержания упомянутых выше лиц около здания Института были подобраны полицией разные прокламации противоправительственного содержания, а в самом здании, где происходила сходка, обнаружено значительное количество разорванной нелегальной литературы.

4-го декабря в том же Институте состоялась сходка исключительно студентов этого учебного заведения, на которой был возбужден некоторыми благонамеренными студентами вопрос о недопущении в стенах Института сходов с посторонними лицами, но студенты, принадлежащие к крайним партиям и поддерживаемые во всех случаях администрацией Института, в особенности инспектором Никитиным, заявили протест против такого решения в крайне дерзкой форме, сопровождавшейся криками: «долой, вон черносотенцев» и т. п. Вследствие такого поведения неблагонадежной части студенчества, приведенный вопрос остался открытым, а остальные студенты из опасения дальнейших осложнений вынуждены были покинуть сходку и разойтись.

Независимо от сего, действительный статский советник Макаров в письме от 19-го минувшего декабря за № 22561 указал на то, что Ваше превосходительство в отношении от 17-го ноября минувшего года за № 2113, возбуждая ходатайство перед Рязанским губернатором об освобождении из заключения учителя городского училища Вишеры, студента Горного института Андрея Лычагина, позволили себе войти в оценку распоряжения административных властей о взятии под стражу этого лица, арестованного в порядке положения о государственной охране за преступную агитацию среди населения Новгородской губернии. По поводу вышеизложенного его превосходительство господин министр торговли и промышленности изволил приказать предложить Вашему превосходительству представить надлежащие по сему делу объяснения.

Примите, милостивый государь, уверения в совершенном почтении и искренней преданности.
Директор Горного департамента Н. Иосса.⁵

Подавление революционного движения сопровождалось массовыми арестами и ссылкой многих студентов.

Евграф Степанович не мог примириться с реакционной политикой царского правительства и всеми имеющимися в его распоряжении средствами, с присущей ему настойчивостью старался спасти своих питомцев. Действия его стали довольно широко известны, и в прославившейся своим черносотенным направлением газете «Новое время» появились статьи, в которых говорилось об опасности Федорова, способствующего процветанию революционных настроений среди студенчества. Самого Евграфа Степановича за его наружность, несколько напоминавшую южанина, газетные писаки называли «евреем, сеющим смуту среди русской учащейся молодежи».

В 1908 г. был произведен новый возмутительный акт против Федорова, инициатором которого явился лидер черносотенцев Пуришкевич.

7 октября 1908 г. в Петербургской реакционной газете «Колокол» была опубликована статья Пуришкевича под названием: «Ростовщичество студентов левых партий Горного института». В этой статье студенты, члены Фондовой комиссии, обвинялись в том, что средства, отпущенные государством для стипендий, и частные пожертвования расходовались ими для помощи революционерам, находящимся в заключении в различных тюрьмах.

16 марта 1909 г. Пуришкевич с трибуны Государственной думы заявил о «революционном засилии», царившем в Горном институте среди студенчества и профессорско-преподавательского состава при покровительстве директора Федорова.

Узнав об этом, левое крыло студенчества с согласия передовой части профессуры в жалобе на имя прокурора Петербургского суда потребовало привлечения Пуришкевича и редактора «Колокола» Смирнова к уголовной ответственности за клевету.

Рассмотрение Петербургским окружным судом дела по обвинению Пуришкевича в клевете длилось три дня:

⁵ И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров, стр. 169—172.

27, 28 и 29 ноября. Сразу же после открытия заседания было оглашено заявление Федорова, в котором говорилось: «Я предполагал выступить по настоящему делу не свидетелем, а поверенным обвинителей». Однако так как студенты вызвали Евграфа Степановича в качестве свидетеля, в ходатайстве ему было отказано. Пять студентов-свидетелей со стороны Пуришкевича, запутавшись в своих показаниях, принуждены были признаться, что их подкупили за 600 рублей.

И все же, несмотря на очевидность фактов, суд Пуришкевича оправдал, а студентов обвинил в подготовке революции.

Директору института Федорову было предъявлено обвинение в покровительстве революционно настроенному студенчеству. Пуришкевичу этого казалось мало, и он настойчиво требовал отстранения Евграфа Степановича от должности директора.

Позорное поведение суда подняло настоящую бурю в газетах. Пресса более или менее прогрессивного направления писала о Федорове как о передовом общественном деятеле, жестоко пострадавшем от реакции. Черносотенные же листки продолжали всячески травить ученого.

По истечении пяти лет пребывания Федорова в должности первого выборного директора Совет института почти единогласно избрал его и на следующее трехлетие. Однако решение Совета не было утверждено министром Тимашевым. Евграф Степанович вспоминает об этом в автобиографии:

«За спасение здания Горного института и его драгоценных коллекций от пожара, за избавление того же учреждения от свирепствовавших в нем эпидемий устройством канализации, за учреждение разведочно-геологического отделения, за подъем научного духа, выразившийся появлением многочисленных работ студентов и журнала „Записки Горного института“ и за ряд других прогрессивных нововведений в институте я был устранен от должности директора, несмотря на единогласный выбор Совета Института».⁶

Отстранение Федорова от должности директора вызвало горячее возмущение студентов института и глубокое

⁶ Там же, стр. 175.

сочувствие профессуры. Студенты преподнесли Федорову адрес, в котором говорилось:

Глубокоуважаемый и дорогой Евграф Степанович!

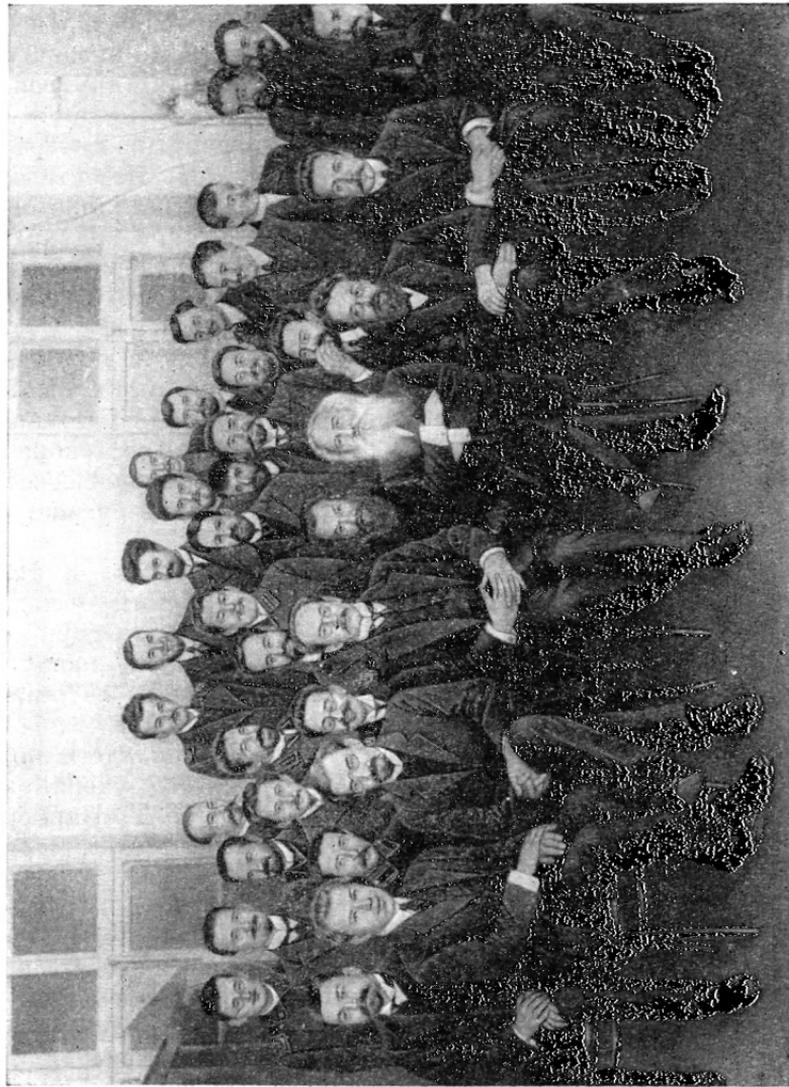
Вы были первым выборным директором в Горном институте; Вы все пять лет своего директорства, совпавших с наиболее тяжелым в общественном смысле временем, неустанно работали на пользу науки и поставили научный уровень Института на редкую высоту; Вы с неизменным благожелательством относились к нам, студентам, ревниво оберегали нашу общественную самостоятельность и готовы были горячо защищать наши общественные учреждения, столь несправедливо и низко оклеветанные.

Многие из нас, старых студентов, пережившие несколько директоров, единодушно констатируют, что не было еще примера, чтобы студенчество так горячо и искренно уважало кого-нибудь из Ваших предшественников, чтобы студенчество заявляло кому-нибудь, кроме Вас, что «авторитет Ваш, как человека и профессора, очень высок и непоколебимо устойчив в глазах студентов Горного института». Расставаясь теперь с Вами как с нашим директором, выражая глубочайшее сожаление по поводу вынужденного оставления Вами этого поста, мы позволяем себе верить, что еще долго-долго Вы будете с нами, могучими шагами двигая вперед науку, оказывая свое светлое и благотворное влияние на весь институт.⁷

Под этим адресом, ярко отразившим глубокое уважение и любовь студенчества к своему бывшему директору, подписалось более 260 человек.

Оставив пост директора, Федоров сохранил за собой в институте лишь кафедры кристаллографии и петрографии, во главе которых он и оставался до самой смерти. Несмотря на неприятности, которые омрачили последний период его административной деятельности, ученый тем не менее ни на минуту не прерывал интенсивной научной работы.

⁷ Там же, стр. 175—176.



Е. С. Федоров среди преподавателей и студентов Горного института
(1910 г.).

В это время он закончил «Царство кристаллов» — труд, посвященный кристаллохимическому анализу. Эта работа — завершение всего предшествующего творчества Федорова в области кристаллографии. Сущность анализа состоит в практическом использовании полученных ранее теоретических выводов, дающих возможность по внешним граням кристалла определять его вещество и тип внутреннего строения.

Нет надобности говорить, какой огромный интерес представлял этот новый метод для химиков. Известный профессор химии Л. А. Чугаев назвал кристаллохимический анализ Федорова «гордостью русской науки». Помимо учеников по Горному институту, ряд молодых специалистов — химиков и кристаллографов из других учреждений — изучил под руководством Евграфа Степановича созданную им методику, помог ему в подборе и обработке новых литературных материалов (из их числа назовем покойного профессора Ленинградского технологического института Б. П. Орелкина и профессоров Ленинградского университета — недавно скончавшегося кристаллографа О. М. Аншелеса и химика-органика Г. В. Пигулевского).

В это же время всеобщее признание получил и федоровский универсальный кристаллооптический метод, нашедший широкое применение при исследовании горных пород. Все это привело к тому, что к Федорову начали стекаться молодые кристаллографы, петрографы и минералогии из многих других учебных заведений.

Иностранные ученые также стремились овладеть новыми достижениями Федорова. В числе его учеников появилось несколько новых имен: профессор Т. Баркер (Оксфорд), профессор Л. Дюпарк (Женева), профессор Джимбо (Токио). Т. Баркер, специально командированный Оксфордским университетом для занятий под руководством Евграфа Степановича, проработал в Петербурге целых два года. Имя Баркера стоит на обложке книги «Царство кристаллов» в числе участников составления монументального федоровского труда наряду с русскими именами — химика Б. П. Орелкина, кристаллографа Д. Н. Артемьева, минералога В. И. Соколова. Впоследствии Баркер разработал свой метод кристаллографического диагноза, представляющий упрощенную разновидность метода Федорова. Профессор Л. Дюпарк

опубликовал французский перевод обширной монографии В. В. Никитина «Универсальный метод Федорова» и усиленно способствовал распространению этого метода за границей. Для изучения федоровского метода Дюпарк специально приезжал в Турьинские рудники к самому Евграфу Степановичу.

В 1910 г. Лондонское минералогическое общество избрало Федорова своим почетным членом. Тогда же он получил звание члена Академии наук в Риме, а спустя два года — почетного члена Французского минералогического общества. В 1914 г. Женевский университет присудил русскому ученому степень доктора физических наук.

В это время, помимо обработки материалов для таблиц по кристаллохимическому анализу, Евграф Степанович все более и более углубляется в область новой (проективной) геометрии. По словам самого ученого, занятия эти служили для него своего рода отдыхом.

Изумительная стройность, внесенная Федоровым в эту область науки, до сих пор приводит геометров в восхищение. Не ограничиваясь разработкой отдельных вопросов новой геометрии, Евграф Степанович стремился популяризовать этот отдел математики, выступая с чтением специального цикла лекций в Горном институте. Особенно подчеркивал он прикладное значение методов новой геометрии в минералогии, петрографии и горном деле. Те, кому довелось слушать этот курс, поражались изяществу и строгости изложения, нашедших свое отражение в созданной им оригинальной системе названий.

После окончания одной из таких лекций присутствовавший на ней профессор-математик воскликнул: «Это не математика, а поэзия в математике!».

Курс лекций Федорова был издан в 1907 г. под названием «Новая геометрия как основа черчения».

Здесь следует остановиться подробнее на педагогической деятельности Евграфа Степановича, а также на его высказываниях по вопросам педагогики. Ряд статей ученого касается постановки преподавания минералогии и кристаллографии в средних и высших учебных заведениях.⁸ «Научить мыслить — задача преподающего», — таков был девиз Федорова.

⁸ Г. Н. Кованько. Е. С. Федоров о преподавании минералогии в средних технических школах. Изв. высш. уч. зав., Геология и разведка, 1959, № 2, стр. 146—151.

В своей программе минералогии он ставил непременно условием знакомить учащихся «с телами неорганической природы на активном опыте». Работая над заданным материалом, ученику надо выступать «как бы самостоятельным исследователем». Учащиеся должны «уметь узнавать не только те образцы, которые покажет им преподаватель, но и знать, как удостовериться в том, что какой-нибудь другой образчик, который они могут встретить где бы то ни было, есть не что иное, как знакомый им минерал или порода».⁹ Вот почему, по мнению Евграфа Степановича, в основу преподавания минералогии должны лечь практические занятия.

Любопытно отметить, что великий кристаллограф категорически протестовал против введения кристаллографии в программы средних школ. «Сама кристаллография как наука, быстро развивающаяся, — писал он в своем курсе, — никоим образом не подлежит преподаванию в средней школе. То же, что сообщается ученикам реальных училищ под этим именем, особенно в наиболее ходячих учебниках, есть лишь пародия на эту науку, способная наперед запутать умы учащихся».¹⁰

Высоки были те требования, которые предъявлял ученый к преподавателям высшей школы, профессорам и заведующим кафедрами. Приведем несколько характерных в этом отношении отрывков из его отзывов:

«В заместителе кафедры в высшем учебном заведении я вижу лишь самостоятельного научного деятеля по предметам кафедры, а потому всякая компилятивная и популяризаторская деятельность отходит в моих глазах на последний план. . . От заместителей кафедр мы ожидаем выпуска работ особенного значения, перед которыми совершенно ступшеваются работы заурядного типа, не вносящие в науку ничего существенно нового, а только обогащающие ее мелкими деталями. . .».¹¹

«Представителю каждой кафедры, конечно, недостаточно знакомства, хотя бы и самого лучшего, с тем, что им самим было вынесено из школы; ему совершенно необ-

⁹ Там же, стр. 150.

¹⁰ Е. С. Федоров. Курс кристаллографии. СПб., 1905, стр. III.

¹¹ Отзыв проф. Е. С. Федорова о кандидатах на замещение кафедры минералогии в Екатеринбургском высшем горном училище, стр. 23.

ходимо следить за научными успехами и не только быть в состоянии их самостоятельно и правильно оценить, но и сейчас же, при возможности, применять то, что составляет явное усовершенствование или в отношении метода, или в отношении выяснения тех научных связей, которые хотя бы были установлены и раньше, но в менее совершенной и ясной форме». ¹²

Нет надобности говорить о том, что сам Евграф Степанович в своей педагогической деятельности стремился строго следовать своим принципам. Сохранилось немало воспоминаний его слушателей, рисующих в живых и ярких картинах Федорова в роли профессора и воспитателя молодежи. В «Воспоминаниях геолога» акад. П. И. Степанова мы находим следующую характеристику ученого и его лекций:

«Е. С. Федоров располагал к себе всех, кто с ним сталкивался. Он обладал необыкновенно привлекательной наружностью: замечательный по форме лоб, откинутаая назад шевелюра вьющихся волос, красивые глаза, прямо смотрящие в лицо собеседнику, — все это обращало на себя внимание. . .

«Лекции Е. С. не были похожи на лекции других профессоров. Он обыкновенно не придерживался содержания, изложенного в его курсе, а давал различные его варианты. Мы иногда не понимали того, что нам говорил Е. С. Федоров, — все это было для нас ново и непривычно. Но мы сознавали, что присутствуем при работе выдающегося ученого. Однажды он читал нам теорию выполнения пространства параллелоэдрами, писал много формул и часто спрашивал, понимаем ли мы? Затем он стал над чем-то задумываться и делать паузы; наконец улыбнулся и, окинув нас взглядом, сказал: „А знаете, это все не так, если вы записали мою лекцию, зачеркните все. . . все, по-видимому, не так. . . нужно это все еще обдумать. . . и знаете, когда у ученого что-нибудь не удастся — это самое интересное в работе“. И слушатели Е. С. Федорова не были недовольны — его лекции остались в памяти на всю жизнь». ¹³

¹² Отзыв профессора Е. С. Федорова об относительном достоинстве трудов М. А. Усова и И. Н. Танатара. Изв. Екатеринбургского горн. инст., 1913, вып. 2, стр. 1.

¹³ П. И. Степанов. Воспоминания геолога. Сб. «Памяти академика П. И. Степанова», Изд. АН СССР, 1952, стр. 32.

На юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения Евграфа Степановича, акад. Д. В. Наливкин в живой и образной форме рассказал о своих студенческих впечатлениях от федоровских курсов. «Вот я в порядке предметной системы дошел до петрографического цикла. Сначала — лекции. Говорят, будет читать Федоров. Это, мол, крупнейший ученый. Ну, а как лекции, очень трудные? Да, трудные: почти никто ничего не понимает. — Почему? — Потому что он рассказывает так, как для себя. Ему понятно, а мы ничего не понимаем. . . Помню, Е. С. читал лекции по новой геометрии. Пошел. Слушал. Это был небольшой факультативный курс. Что-то начало увлекать. Читать надо глубоко, читать особенно. . . Вот у меня и осталось такое впечатление о Е. С., что это человек, который мыслил пространством. Мы, в основном, мыслили плоскостями, а он мыслил пространством. Для него пространство было самым обыкновенным, и это было для нас тяжело».¹⁴ Из последних слов становится понятным, почему лекции Е. С. казались студентам такими трудными.

Ученый всецело полагался на математические способности своих слушателей.

Очень картинно вспоминает федоровские лекции профессор Н. К. Разумовский: «Вся аудитория была завалена моделями, на стене висели огромные круги стереографических проекций. Е. С. Федоров был маленького роста, большеголовый. Впечатление большеголовости еще усиливалось пышной шевелюрой и белой окладистой бородой. Он не был хорошим оратором. Рассказывая, он закрывал глаза и, называя грани, вытянутой рукой всегда показывал их положение в воздухе».¹⁵ Далее из воспоминаний Н. К. Разумовского видно, как Е. С. стремился сделать свои выводы по возможности наглядными: «Рассказав о какой-либо простой форме, он делал паузу, хитровато и весело улыбался и говорил тоненьким голосом, явно желая произвести эффект: „И вот вы ее можете видеть в гоноэдре, стоит только поставить тройную ось вот так. . . и четверную так. . . готово!“. Мы подходим к прибору — трехгранному углу из зеркал,

¹⁴ Протоколы Юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения Е. С. Федорова (Каф. кристаллографии Ленингр. горн. инст.).

¹⁵ Там же.

в котором была налита ртуть, и видим нужную форму под довольный смех профессора. Но читал он не элементарно, постоянно ссылаясь на свои специальные работы и их приходилось читать, главным образом в журнале „Записки Горного института“». ¹⁶

Из всех приведенных отрывков видно, что Евграф Степанович, читая лекции, стремился вовлечь в процесс своей умственной работы юных слушателей. Он пытался сделать их активными соучастниками своих открытий. Увлекаясь и импровизируя, профессор забывал о своем превосходстве и об огромной разнице между ним, убеленным сединой гениальным ученым, и зелеными юнцами, только что перешедшими со школьной скамьи в студенческую аудиторию. И все же такой подход не был ошибочным. Искры, брошенные ученым, зажглись в целом ряде молодых умов. Плеяда блестящих ученых федоровской школы лучше всего доказывает принципиальную правоту его метода.

В воспоминаниях о Евграфе Степановиче обычно отмечаются его исключительная благожелательность и трогательная доверчивость в отношении студентов. Акад. Д. В. Наливкин рассказывает об этом так: «Порядок экзаменов был следующий. Е. С. сидит у себя в кабинете. Приходит студент, он дает ему шлиф. А затем студент может уйти в соседнюю комнату, в другую комнату, на улицу, куда угодно, а Е. С. верил, что студент сидит в соседней комнате и определяет. . . Вот это доверие к человеку, стремление видеть в нем лучшее, это действительно было полным отражением характера самого Евграфа Степановича». ¹⁷

Об этом же пишет в своих «Основах кристаллооптики» и проф. В. Н. Лодочников, отмечая, однако, непреклонность Федорова в отношении принципиально важных вопросов. «Бесконечно доверчивый и столь же снисходительный к студентам в своих экзаменационных требованиях, Е. С. Федоров становился почти неумолимым, когда студент смешивал эти понятия (понятия о световых волнах и световых нормалях, с одной стороны, и понятие о лучах, с другой, — *И. Ш.*)». ¹⁸

¹⁶ Там же.

¹⁷ Там же.

¹⁸ В. Н. Л о д о ч н и к о в. Основы кристаллооптики. Госгеолыздат, 1947, стр. 30.

Конечно, легко себе представить, как плутоватые и легкомысленные студенты обманывали доверчивого профессора, добывая отметки о сдаче экзаменов и зачетов. Однако не надо забывать и того, что такое отношение великого ученого к молодежи имело и большое воспитательное значение, заставляя задумываться о долге, чести и серьезном отношении к науке.

Можно ли утверждать, что Федоров, несмотря на трудную усваиваемость его лекций и отсутствие строгости в требованиях, был выдающимся профессором, замечательным педагогом? Лучшим ответом являются его замечательные ученики — А. К. Болдырев, А. Н. Заварицкий, С. С. Смирнов, В. Н. Лодочников, В. А. Николаев, О. М. Аншелес, Б. Н. Орелкин и многие другие.

В своих трудах по кристаллографии, минералогии петрографии и химии эти исследователи развили идеи великого учителя, высоко подняв славное знамя федоровской школы.

«ЦАРСТВО КРИСТАЛЛОВ»

«Царство кристаллов» — огромная книга со специальными таблицами по кристаллохимическому анализу и обширным атласом с многочисленными проекциями кристаллов — является плодом гигантского труда Федорова и его сотрудников, длившегося десятки лет. Книга эта, увидевшая свет уже после смерти Евграфа Степановича, подводит итог напряженнейшей сорокалетней работе ученого.

«Современная человеческая культура так тесно связана с успехами ряда специальных наук, что благодаря этому на нее как бы наложена особая печать и она резко отличается от всех прежних культур.

«Причина такого положения вещей состоит в том, что столь сильно развившиеся науки не только удовлетворяют духовным потребностям части человечества, но одновременно сообщают ей великую власть направлять действующие в природе силы на пользу людей и тем самым заставляют саму природу все в большей степени служить человечеству. В ходе последнего периода истории культуры четко выделяется назначение специальных наук — овладеть в том или ином отношении природой и в известной области природных явлений направлять эти последние соответственно желанию людей», — этими словами Федоров начинает введение к книге «Царство кристаллов». При чтении их невольно вспоминается знаменитый девиз великого преобразователя природы И. В. Мичурина: «Мы не можем ждать милости у природы, взять их у нее — наша задача».

Далее Евграф Степанович указывает, что «к отстающим в указанном смысле дисциплинам следует причислить также и кристаллографию». И это несмотря на то, что данная наука «играет существенную роль как ос-

Новая дисциплина минералогических наук и той части горного искусства, которая имеет своим предметом использование естественного сырья.

Чем же объясняется такое отставание?

«Как явствует из самого названия нашей науки, кристаллография имеет своим главным предметом внешние формы кристаллов». Казалось бы, изучение внешнего ограничения кристаллических многогранников и должно было привести к наиболее важным практическим выводам. «Можно было бы ожидать, — писал Федоров, — что если вещество дает хорошие кристаллы и принадлежит к хорошо изученным, то его можно будет по форме кристаллов легко и хорошо определить.

«Однако, как ни странно это звучит, кристаллографы очень хорошо знают, что это не так. Единственный случай, когда колоссальная кристаллографическая литература может прийти на помощь, — это тот случай, когда требуется ответить на вопрос: есть ли данное хорошо выкристаллизовавшееся вещество то самое, которое было заранее предположено.

«Таким образом, кристаллография была действительно полезной для минералогии до той поры, пока общая сумма минералов не увеличилась настолько, что уже редко удается для каждого данного минерала найти определенный, заранее предположенный ответ. Когда число хорошо определенных минералов было гораздо меньше, каждый опытный минералог мог для каждого данного минерала построить некоторые предположения и посредством измерения углов подтвердить или отвергнуть эти предположения. . .

«Насколько мне известно, ни одному специалисту кристаллографии никогда не приходило в голову определять по форме кристаллов всякое вообще вещество, а не только одни скупо представленные минералы».¹

Определение вещества по внешней форме его кристаллов — вот та чрезвычайно важная с практической точки зрения задача, которой Федоров посвятил свой кристаллохимический анализ.

¹ E. Fedorow. Das Krystallreich. (Царство кристаллов). Зап. Академии наук по Физ.-мат. отд., 1920, т. XXXVI. Русский перевод немецкого текста предисловия цит. по сб.: «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 5—80.

Из приведенных выше его собственных слов видно, что за разрешение этой задачи он взялся впервые.

В чем же заключались те трудности, которые мешали предшественникам Евграфа Степановича разрешить эту проблему?

История кристаллографии показывает, как необычайно медленно и трудно развивалось учение о формах кристаллических многогранников. Особенности затруднения для исследователей представляли искажения реальных форм, обычно имеющие место на природных кристаллических образованиях. В качестве примера возьмем кристаллы кварца. На любом из них можно обнаружить грани двух сортов: одни из них покрыты хорошо заметной штриховкой (грани гексагональной призмы), другие обладают гладкой поверхностью (ромбоэдрические грани, рис. 3). При идеальных условиях роста все шесть заштрихованных граней, в силу своего одинакового внутреннего строения, должны развиваться одинаково, образуя правильную шестигранную (гексагональную) призму (рис. 3, а, б). Такие правильные призмы на реальных кристаллах наблюдаются лишь в редких случаях. Чаще всего, в связи с неидеальными условиями роста, грани призмы развиваются неравномерно, образуя искаженную форму (рис. 3, в). Ясно, что установить истинную симметрию кристаллов, исходя из их реальных, обычно искаженных форм, долгое время не удавалось. На помощь здесь пришел закон постоянства углов.

Гораздо более существенной трудностью является то, что при различных условиях кристаллы одного и того же вещества могут иногда покрываться гранями различных сортов. Так, например, в некоторых случаях образуются кристаллы кварца с одними только гладкими (ромбоэдрическими) гранями. Штрихованные грани на таких кристаллах вовсе отсутствуют. Имеются месторождения, где кристаллы кварца по форме приближаются к кубам («кубический кварц») вследствие того, что на них развивается всего лишь шесть ромбоэдрических граней. Обычные кубические кристаллы поваренной соли при особых условиях превращаются в октаэдры. Ясно, что различные формы кристаллов одного и того же вещества могли бы оказаться непреодолимым препятствием для определения состава по методу кристаллохимического анализа.

К счастью, такие случаи встречаются сравнительно редко. Вот что об этом писал Федоров:

«В недавнее время, когда пришлось изучать богатейший материал опыта (многие тысячи веществ в окристаллизованном виде), стало все-таки ясно, что как ни разнообразятся комбинации в своем развитии, все-таки между ними встречаются такие, для которых весьма характерно замечательное упорство появления. Можно сказать, что в преобладающем большинстве исследованных случаев некоторые формы попадаются на всех кристаллах данного вещества, хотя бы и в разной степени своего развития. Нельзя поэтому такие формы не признать особенно важными для характеристики кристаллов этого вещества. Но при всем том нельзя не признать и отдельных исключений, когда одно и то же вещество в разных случаях появляется в формах, не имеющих между собой ничего общего.

«Этот факт весьма затрудняет установить какие бы то ни было основания для кристаллохимического анализа, и если вообще таковой оказался возможным, то только потому, что такие факты исключительны по своей редкости. Этот анализ, по опыту, дает возможность сделать правильное определение в 75—80% всех случаев».²

Предшествующие исследователи, введенные в заблуждение изменчивостью природных многогранников одного и того же вещества, нередко отрицали всякое их значение.

«Кристаллическая форма не имеет постоянного характера. Она более разнообразна и более изменчива, нежели любой другой признак, позволяющий различать минералы»,³ — писал в конце XVIII в. известный французский натуралист Бюффон (1707—1788).

Однако современник Бюффона — наш великий соотечественник М. В. Ломоносов — уже знал о том, что кристаллам каждого определенного вещества соответствует своя характерная форма. В «Слове о рождении металлов» (1761) он подчеркивал практическое значение таких форм в рудном деле: «Руды показываются двояким образом, из которых иные держатся свойственной себе посто-

² И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров. Изд. АН СССР, М.—Л., 1951, стр. 187—188.

³ M. De Rome de l'isle. Cristallographie, vol. I, стр. XVIII.

янной фигуры, как кубические марказиты, желтой сферической колчедан, угловатой белой колчедан, иглам подобная сурьма и многие другие».⁴

Впоследствии, как известно, это мнение было полностью всеми признано. «Кристаллическая форма составляет один из важных внешних признаков, характеризующих отдельные определенные химические соединения»,⁵ — неоднократно подчеркивал Д. И. Менделеев. Мы знаем, однако, что характеристика форм получается не так просто. Вспомним здесь закон постоянства углов, закон Стено—Ломоносова—Ромэ Делиля. Для кристаллов определенного вещества могут изменяться величина и относительное развитие граней или ребер и даже их количество. Одно лишь остается постоянным и неуклонным, согласно этому закону, — углы между соответственными гранями (и ребрами).

Итак, измерив углы между гранями исследуемого кристалла, мы получаем не только понятие о его истинной симметрии, но путем сравнения с имеющимися данными прежних измерений можем доказать его принадлежность к тому или иному веществу. Поэтому-то закон постоянства углов Федоров и положил в основу кристаллохимического анализа.

Однако при разработке своего метода ученый не ограничился одной только задачей определения вещества. Федоровский кристаллохимический анализ дает возможность, исходя из гониометрического изучения кристалла, с одной стороны, определить вещество, а с другой — получить наиболее вероятные, хотя и схематические представления, судя по его внешним формам, о внутреннем строении кристалла.

Достоинства такого анализа очевидны.

В самом деле, при обычном химическом анализе вещество переводится в раствор, т. е. не сохраняется, тогда как после гониометрического измерения кристалл остается в том же виде, как и до анализа, и может служить, таким образом, вещественным документом.

Для исследования методом Федорова требуется весьма малое количество вещества, — иногда даже достаточно

⁴ М. В. Ломоносов. Полное собрание сочинений, т. 5, Изд. АН СССР, М.—Л., 1954, стр. 340—342.

⁵ Д. И. Менделеев. Основы химии, т. I, Изд. 10. Л., 1931, стр. 255.

лишь одного кристаллика величиной хотя бы с булавочную головку. Необходимо отметить также скорость определения, не зависящую от сложности состава. В особо благоприятных случаях исследование длится всего лишь около часа, при более сложных обстоятельствах оно занимает 3—4 часа. Итак, в смысле затраты времени метод Федорова несравним с обычным химическим анализом вещества.

Как и всякий метод, кристаллохимический анализ имеет и некоторые ограничения. Некоторые из них следует отметить: определение возможно только при наличии хорошо образованных кристаллов; вещества кубической сингонии с равными углами между гранями одинаковых форм гониометрически неотличимы; анализ может быть произведен лишь для веществ, помещенных в таблицах «Царства кристаллов».

Все эти ограничения, однако, никак не умаляют значения метода Федорова. Всякому специалисту хорошо известно, что вполне надежные результаты обычно получаются лишь при одновременном использовании нескольких методов, взаимно дополняющих и корректирующих друг друга. В этом отношении кристаллохимический анализ можно смело поставить в один ряд с химическим, оптическим и прочими методами исследования.

В основу своего метода Федоров положил, с одной стороны, закон постоянства углов, с другой — свою собственную теорию кристаллического строения. Здесь уже говорилось, что путем сравнения измеренных на гониометре углов с имеющимися данными можно доказать принадлежность исследуемого кристалла к тому или иному веществу. Однако такое определение будет очень усложнено огромным количеством угловых величин, буквально наводняющих кристаллографическую и минералогическую литературу. Чтобы разобраться в этом множестве цифровых данных, Федоров, помимо измерения углов, предлагает принимать во внимание развитие кристаллических граней, связывая наличие наиболее крупных и частых граней с внутренним строением вещества. Таким образом, попутно, по внешним формам кристалла определяется тип его структуры. Чтобы получить понятие о связи внешних кристаллических плоскостей (граней) и внутреннего строения вещества, не-

обходимо вспомнить уже описанные выше основы федоровской теории структуры кристаллов.

Теория эта базируется на чисто геометрической задаче, блестяще разрешенной Евграфом Степановичем еще в бытность студентом в его первой книге «Начала учения о фигурах».

Как нам уже известно, Федоров вывел до конца все многогранники, которые, будучи равными, параллельно расположенными и смежными по целым граням, заполняют пространство без остатка. Такие многогранники он называл «параллелоэдрами».

Нам уже знакомы четыре типа параллелоэдров, выведенных Федоровым (рис. 12).

Теперь вспомним, каким образом задача о выполнении пространства параллелоэдрами связана с теорией Федорова о кристаллическом строении. Согласно Браве, структура кристаллов представляется как бесконечное множество элементарных частиц, расположенных на равных расстояниях друг от друга по параллельным направлениям и в общем случае на неравных расстояниях по различным направлениям. Совокупность таких частиц образует, как мы знаем, пространственную решетку. Федоров, задавшись целью более детально изучить различные типы кристаллических решеток, рассматривал элементарные частицы, слагающие решетку, вместе с окружающим их пространством. Если разделить пространство поровну между такими частичками, то на каждую из них придется свой пространственный участок, принадлежащий только данной частичке. При этом каждая частичка оказывается как бы заключенной внутри футляра, вырезанного из окружающего пространства. При наличии одинаковых частиц все такие футляры должны быть также совершенно одинаковыми. Все они равны и параллельны друг другу и разделяют пространство на равные участки. Ясно, что формы этих футляров должны соответствовать параллелоэдрам. Таким образом, для того чтобы вывести различные типы решеток, нужно разделить пространство на равные ячейки, соответствующие параллелоэдрам, и в центр каждой из них поместить элементарную частичку.

Заполняя пространство наиболее симметричными параллелоэдрами и выделяя их центры, мы приходим к четырем федоровским решеткам: простой (гексаэдрической),

центрогранной (додекаэдрической), центрированной (октаэдрической) и гексагональной (призматической) (рис. 30). Первые три имеют ячейки в виде кубов, четвертая резко отличается от них по своей форме, будучи гексагональной. Все остальные решетки, соответствующие менее симметричным параллелепедрам, выводятся из четырех идеальных решеток путем однородных деформаций — растяжений и сдвигов.

Таким образом, весь мир кристаллов по форме своих решеток резко подразделяется на два вида. Первая группа кристаллов приближается к кубическим, вторая — к гек-

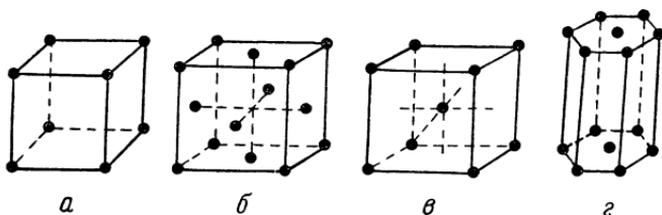


Рис. 30. Четыре исходных типа решеток, по Е. С. Федорову.

a — простая, *б* — центрогранная, *в* — центрированная, *г* — призматическая.

сагональным. В этом состоит один из основных законов кристаллографии, открытый Федоровым. Он носит название закона кристаллографических пределов, или закона Федорова. Читатель, знакомый с минералами, сразу же вспомнит многочисленные примеры, иллюстрирующие федоровский закон. Так, например, пластины слюды, относящиеся к низкосимметричной (моноклинной) сингонии, являются «псевдогексагональными», приближаясь по своей форме к правильным шестиугольникам. Ромбический барит, раскалываясь по спайности, образует кубические осколки, являясь тем самым «псевдокубическим». Изучавшие минералогию хорошо помнят прием, с помощью которого можно отличать друг от друга обычно черные или темно-зеленые шестоватые кристаллы пироксенов и амфиболов. Спайные плоскости образуют на первых углы, близкие к 90° , а на вторых — углы, приближающиеся к 120° , и это несмотря на то, что и пироксены и амфиболы принадлежат к низкосим-

метричным сингониям. Эти характерные углы открывают нам псевдогексагональность амфиболов и псевдокубичность, вернее, псевдотетрагональность пироксенов.

Каким же образом кристаллохимический анализ дает возможность судить по внешней форме кристалла о его внутреннем строении?

Согласно закону Браве, полностью принятому Федоровым и, в общем, выдержавшему испытание временем, грани кристалла соответствуют плоскостям пространственной решетки, вдоль которых расположены элементарные частицы. Такие плоскости называются плоскими

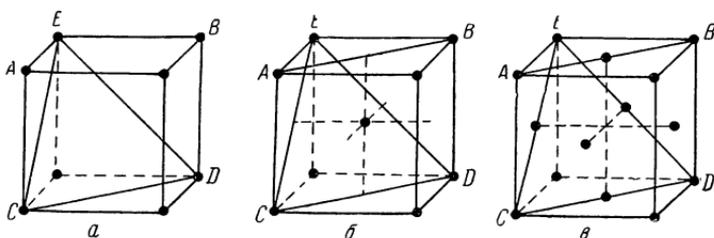


Рис. 31. Важнейшие плоские сетки в кубических решетках.

сетками. Наиболее развитые и наиболее часто встречающиеся грани кристаллов совпадают с плоскими сетками, наиболее густо покрытыми элементарными частицами.

Рассматривая разобранные выше типы решеток, можно решить, какие грани будут в первую очередь развиваться на кристаллах, обладающих той или иной решеткой. Так, например, в случае простой кубической решетки наиболее густо покрыты частицами плоские сетки, совпадающие с гранями куба. Отсюда следует ожидать, что в кристаллах, обладающих простой кубической (гексаэдрической) решеткой (а), наиболее частыми и развитыми гранями будут грани куба. В центрированной (октаэдрической) решетке (б) наибольшей густотой в смысле расположения частиц отличаются сетки, проходящие вдоль диагональных плоскостей $ABCD$ (рис. 31). Это будут грани ромбододекаэдра. Следовательно, в кристаллах этого типа больше всего будут развиваться не грани кубов, а грани, плоскости которых соответствуют плоским сеткам, подобным $ABCD$, т. е. ромбододекаэдри-

ческие грани. Наконец, в структуре типа центрогранной (додекаэдрической) решетки (б) преобладают грани октаэдра или тетраэдра, соответствующие плотнейшим сеткам *DEC*. Совсем особняком в смысле развития граней стоят кристаллы с гексагональной структурой.

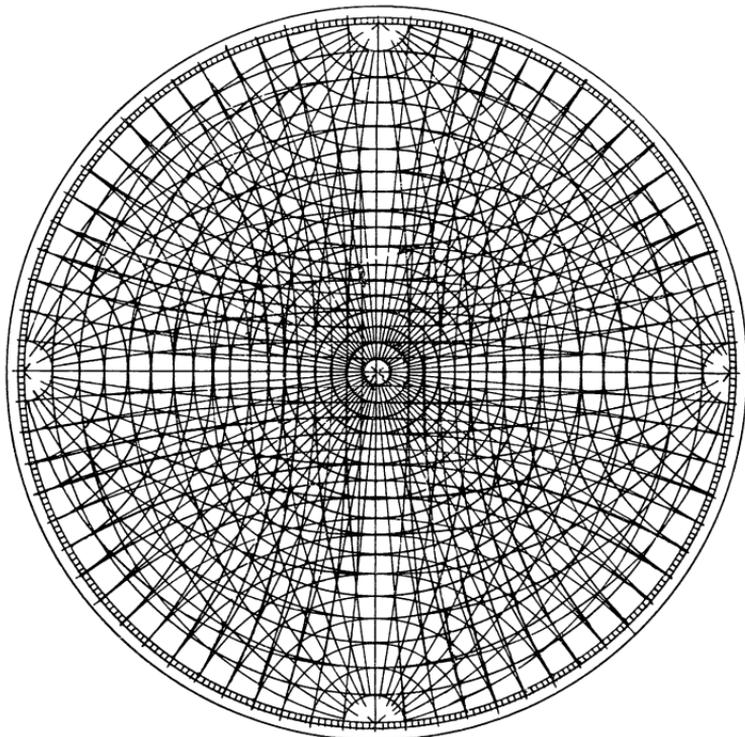


Рис. 32. Стереографическая сетка Федорова.

Отсюда можно заключить, что внешняя форма кристалла, т. е. его ограничение, позволяет судить о внутреннем его строении.

Кристаллохимический анализ Федорова заключается в следующем: исследователь, пользующийся федоровским методом, должен: 1) прежде всего измерить кристалл (или лучше несколько кристаллов того же вещества) на двукружном гониометре; 2) нанести его на проекцию с помощью специальной стереографической сетки Федорова (рис. 32), дающей точное понятие о величинах изме-

ренных углов; 3) провести на проекции дуги больших кругов (пояса), на которых лежат проекции граней, пересекающихся в параллельных ребрах; 4) выделить те пояса, на которых углы между гранями приближаются к 90° или 120° (для этого в моноклинных и триклинных кристаллах производятся на сетке дополнительные графические операции, соответствующие сдвигам); 5) просмотреть, по возможности, большее число кристаллов данного вещества и определить статистический порядок различных граней по частоте их встречаемости и степени развития, что должно выявить зависимость форм от плотностей сеток, т. е. от структуры кристалла; 6) придать кристаллу несколько наиболее возможных установок, отвечающих тому или иному из четырех типов федоровских структур, подходящих к данному случаю; 7) вычислить по имеющимся специальным таблицам теоретические плотности сеток имеющихся граней для каждой из вышеупомянутых установок и структур; 8) принять за «правильную» («структурную») ту установку, при которой теоретический порядок граней по вычисленным плотностям сеток будет наиболее близко совпадать с реальным порядком частоты встречаемости и степени развития граней (для достижения однозначности установки при этом применяются некоторые условные правила); 9) отсчитать по сетке некоторые угловые величины, в основном показывающие отклонения кристаллов от идеального кубического или гексагонального типа, и объединить их в виде совокупности углов по определенной схеме (символ комплекса); 10) отыскать в таблицах «Царства кристаллов» вещество с аналогичным символом комплекса и тем самым отождествить с ним вещество исследуемого кристалла.

Таким образом, в кристаллохимическом анализе Федорова следует различать два важных момента: с одной стороны, определяется вещество кристалла, а с другой — по внешним формам находится тип его внутреннего строения. В отношении первого момента метод Федорова сохранил все свое значение и до сих пор. Пользуясь таблицами «Царства кристаллов», мы можем и сейчас определять вещество изучаемых кристаллических многогранников. Вопрос о возможности безошибочного определения типа структуры по ограничению кристалла значительно сложнее. Ввиду его большого теоретического интереса

следует на нем остановиться несколько подробнее.

Нельзя забывать того, что предложенный Федоровым метод определения внутреннего строения кристалла по его внешним формам являлся первой попыткой косвенного определения расположения элементарных частиц в кристаллах. Изучение кристаллических образований при помощи рентгеновских лучей дало впоследствии возможность опытным путем как бы нащупать атомы или ионы, входящие в решетки, заглянуть внутрь кристаллических структур. До этого гениальная попытка Федорова была единственным возможным путем, позволявшим судить о характере структуры.

Само собой разумеется, что метод Федорова давал лишь приближенную схему пространственного расположения элементарных частиц в кристаллах. Изучение кристаллических структур при помощи рентгеновских лучей подтвердило правильность теории, созданной Федоровым. Четыре типа решеток, выведенных им, лежат в основе всех реальных кристаллических структур. Однако реальные структуры часто состоят не из одинаковых «элементарных частиц», которые Федоров принимал за молекулы, а из атомов или ионов различных химических элементов. Каждый отдельный сорт таких атомов или ионов слагает в общей кристаллической структуре как бы свою отдельную федоровскую решетку. Таким образом, реальные кристаллические структуры как бы состоят из нескольких федоровских решеток, вдвинутых по определенному закону друг в друга. Все эти решетки, входящие в одну и ту же структуру, геометрически подобны друг другу, но химически могут быть различными. В качестве примера рассмотрим строение поваренной соли (рис. 21).

Структура поваренной соли слагается из частиц двух видов — ионов натрия и ионов хлора. На рисунке первые изображены белыми, а вторые — черными кружками. Приняв во внимание одни белые кружки, легко убедиться в том, что они располагаются по вершинам кубической ячейки и в центрах ее граней. Мысленно достроив изображенную на рис. 21 систему и приняв теперь во внимание уже только черные кружки, увидим, что и они образуют, в свою очередь, также центрогранную кубическую решетку. Итак, реальная структура поваренной соли состоит как бы из двух центрогранных кубических решеток

Федорова, вдвинутых друг в друга. Одна из этих решеток построена из ионов натрия, другая — из ионов хлора. Метод Федорова должен давать возможность определить лишь тип решеток, входящих в реальную структуру, с его помощью мы должны получить общую схему — строение кристаллов, их геометрический скелет.

Действительно, пользуясь методом кристаллохимического анализа, мы в ряде случаев можем правильно определить тип решетки. Однако в целом ряде случаев в связи со сложностью реальных структур правильное решение получить невозможно. Возьмем опять в качестве примера поваренную соль (NaCl). В природе и лабораторных условиях кристаллы поваренной соли в большинстве случаев кристаллизуются в виде кубиков. Исходя из этого, мы должны были бы приписать ей простую кубическую решетку (в простой кубической решетке наибольшей плотностью сеток обладают грани куба). Но структура хлористого натрия соответствует кубической центрогранной решетке (ионы натрия и ионы хлора, взятые в отдельности, образуют кубические центрогранные решетки). В такой решетке плотнейшими сетками являются октаэдрические грани. Отсюда следовало бы ожидать, что на кристаллах поваренной соли в первую очередь должны развиваться грани октаэдра. Чем объясняется такое несоответствие?

Дело в том, что форма кристаллов зависит не только от внутреннего их строения (структуры), но и от порождающей внешней среды. Одна и та же структура может образовывать различные внешние формы при различных физико-химических условиях, т. е. при различной температуре, различном давлении, наличии различных примесей в растворе, и т. д. Обратимся к той же поваренной соли. Уже в XVIII в. натуралистам было известно, что из чистых водных растворов хлористый натрий всегда кристаллизуется в виде кубов, в то же время в растворах, содержащих щелочь или мочевину, та же поваренная соль образует октаэдры. В литературе неоднократно затрагивался вопрос о причинах этого явления. Указывалось, что в чистой водной среде при отсутствии каких-либо факторов, усложняющих кристаллизацию, ионы натрия и хлора могут считаться как бы равноправными. Рассматривая такие ионы как равнозначные (мысленно как бы окрашивая их на модели структуры в один цвет), мы све-

дем структуру хлористого натрия к простой кубической решетке (рис. 33, б).

В такой решетке на первом месте в отношении плотностей сеток стоят грани куба. В условиях, когда имеет место сильное взаимодействие между ионами одного сорта (или натрия, или хлора) и окружающей средой, ионы одного сорта, окрашенные на модели хлористого натрия в один цвет, как бы выпячиваются, тогда как частицы другого цвета затушевываются. В результате структурная модель поваренной соли как бы трансформируется

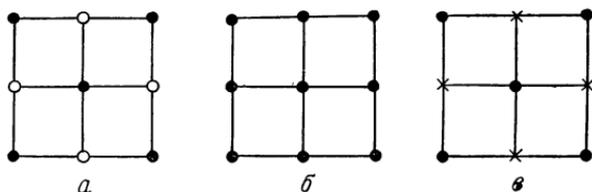


Рис. 33. Динамика сетки (100) для структуры NaCl в химически различных средах.

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

в кубическую центрогранную решетку (рис. 33, в). Важнейшие грани здесь будут соответствовать сеткам, наиболее плотно усаженным ионами лишь одного сорта. В структуре типа поваренной соли этими сетками являются грани октаэдра. Ясно, что такое двойственное поведение кристаллов поваренной соли весьма затрудняет правильное нахождение их структуры с помощью кристаллохимического анализа.⁶

В каких же случаях федоровский метод дает возможность правильно определить тип решетки или даже всей структуры в целом?

Оказывается, это может быть сделано лишь в том случае, когда вся она сводится к одной из пространственных решеток Федорова. Так как все узлы такой решетки должны быть совершенно одинаковыми, то этот случай будет иметь место лишь у кристаллов тех элементов, кристаллическая структура которых образует одну фе-

⁶ В. И. Михеев и И. И. Шафрановский. Достоверность определения типа структуры по методу Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография», вып. 1, Изд. Ленингр. горн. инст., 1951.

доровскую решетку. К ним, например, относятся кристаллы самородной меди, золота, серебра, платины, структура которых сводится к одной центрогранной решетке.

По методу Федорова их структура целиком может быть определена безошибочно.

В случае более сложных структур особо благоприятные условия для определения федоровской решетки возникают при наличии активной среды, выдвигающей на первый план значение ионов одного сорта. В том случае, если эти ионы слагают одну решетку, тип этой решетки также может быть безошибочно определен по методу Федорова. Именно такой случай характерен для кристаллов хлористого натрия, выросших в виде октаэдров из растворов, содержащих щелочь или мочевины.

Наконец, нельзя не упомянуть еще одного случая, когда совокупность атомов структуры образует как бы одну суммарную решетку, в которой разнородные атомы могут рассматриваться как одинаковые (такова «простая кубическая» решетка поваренной соли, если мы выкрасим ионы натрия и хлора на рисунке в один цвет). При наличии нейтральной среды такие атомы должны вести себя как одинаковые. В этом случае метод Федорова дает понятие о пространственном расположении всех атомов, входящих в структуру, не разделяя их по элементам и сводя их к одной решетке.

Следует подчеркнуть, что для метода, который был разработан до рентгеноанализа, полученные результаты по определению типа решетки нельзя не считать замечательными.

Кристаллохимический анализ Федорова безусловно свидетельствует о глубоком проникновении автора в тайны строения вещества.

В настоящее время благодаря развитию методов непосредственного определения кристаллических структур с помощью рентгеновских лучей способ нахождения типа решетки, по Федорову, имеет главным образом исторический интерес.

Вместе с тем значение кристаллохимического анализа как метода определения вещества целиком сохранилось и до сих пор.

В 1910 г., закончив вчерне свои таблицы по кристаллохимическому анализу, Федоров, желая испытать их на практике, обратился с открытым письмом к русским и

иностранным ученым с предложением прислать ему кристаллы каких-либо веществ для того, чтобы он мог определить их химический состав при помощи своего метода. Из присланного большого количества кристаллов Евграфу Степановичу удалось в 75% случаев правильно определить их состав. Этот результат следует признать весьма удовлетворительным, так как среди присланных кристаллов оказались специально подобранные экземпляры с необычным развитием форм, присутствием редких граней и т. п.

Предложенный Федоровым метод анализа произвел большое впечатление как в России, так и за границей. Знаменитый русский ученый-химик Л. А. Чугаев называет кристаллохимический анализ «гордостью русской науки». Ученики Федорова — химики-органики В. П. Орелкин и Г. В. Пигулевский — сравнивают роль своего учителя в кристаллографии с ролью Чарльза Дарвина в биологии. По их мнению, метод Федорова дает естественную классификацию кристаллов, подобную естественной классификации организмов, базирующейся на единстве их происхождения.

Применение кристаллохимического анализа привело в ряде случаев к важным результатам. Интересный случай, например, приводится в популярной книге профессора Ю. В. Вульфа «Кристаллы, их образование, вид и строение». Во время операции у больного был извлечен хорошо образованный кристаллик величиной с горошину. Незначительные размеры этого кристаллика не позволили исследовать его обычным химическим путем. С помощью метода Федорова эта задача была блестяще разрешена — кристаллик оказался салолом.

Идея федоровского кристаллохимического анализа оказалась чрезвычайно жизненной. В несколько измененном и упрощенном виде гониометрический способ определения вещества получил широкое распространение не только у нас, но и за рубежом. Английский ученик Евграфа Степановича Т. Баркер предложил упростить методику кристаллохимического анализа и создать новый определитель. После смерти Баркера группа его последователей (М. Портер, Р. Шпиллер и др.) продолжали этот труд. В настоящее время вышел в свет целый ряд увесистых томов под общим заглавием «Определитель кристаллов Баркера».

В 1925 г. выдающийся ученик и продолжатель дела Федорова профессор Ленинградского горного института А. К. Болдырев в специальной статье указал, что при определении вещества по кристаллическим формам можно обойтись без определения структуры и без однозначной установки.⁷ По Болдыреву, единственной абсолютно необходимой основой для диагноза кристаллов является эмпирический материал гониометрии кристаллов и закон постоянства углов. Основным принципом предложенного им упрощенного метода является непосредственный переход от измерения кристалла к определению вещества, минуя определение структуры и однозначную установку.

Схематический ход анализа, по Федорову, и ход анализа, по Болдыреву, можно представить следующим образом.

По Федорову:

измерение углов \rightarrow однозначная установка \rightarrow определение структуры \rightarrow определение вещества.

По Болдыреву:

измерение углов \rightarrow определение вещества.

Основные понятия, необходимые для усвоения метода Болдырева, целиком укладываются в элементарной кристаллографии.

После измерения кристалла исследователю, прибегнувшему к этому методу, следует непосредственно обратиться к самой задаче определения вещества. Для этого нужно воспользоваться определяющими углами, измеренными на гониометре. Определяющим углом называется угол, образованный характерным направлением в кристалле и нормалью к какой-либо косо ориентированной грани кристалла. Характерное направление кристалла обычно стараются совместить с горизонтальной осью федоровского гониометра. Тогда определяющий угол будет отвечать координате ρ , отсчитываемой по горизонтальному лимбу гониометра.

Характерным направлением для тетрагональных кристаллов будет ось симметрии четвертого порядка, для гексагональных и тригональных кристаллов — ось шестого или третьего порядков, для ромбической синго-

⁷ А. К. Болдырев. Принципы нового метода кристаллографического диагноза вещества. Зап. Минералог. общ., ч. 53, вып. 2, 1925.

нии — любая ось второго порядка, для моноклинной сингонии — ось второго порядка или перпендикуляр к плоскости симметрии, для триклинной — нормали к наиболее развитым граням.

Итак, взяв, например, для определения какой-нибудь тетрагональный кристалл, достаточно измерить угол между четверной осью симметрии и перпендикуляром к одной из его косых граней (рис. 34). Такой угол и будет определяющим.

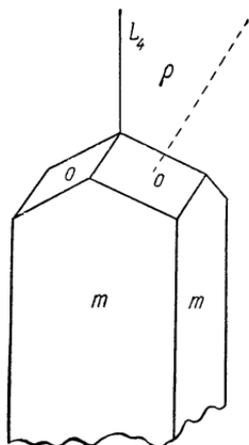


Рис. 34. ρ -определяющий угол в тетрагональном кристалле.

Измерив определяющие углы, исследователь обращается к специально составленному «Определителю кристаллов». «Определитель» состоит из двух частей. Первая из них представляет «ключ», где собраны и расставлены в возрастающем порядке все определяющие углы, принадлежащие той или иной сингонии (каждой сингонии соответствует свой ключ). Во второй части «Определителя» дается описание кристаллов, составленное по имеющимся литературным данным. Найдя в ключе ряд углов, близко подходящих к измеренному определяющему углу, исследователь по ссылкам ключа находит во второй части «Определителя» соответственные описания кристаллов.

Исследуемый кристалл будет отвечать тому веществу в «Определителе», описание и углы которого тождественны наблюдавшимся.

Группой кристаллографов и учеников А. К. Болдырева было опубликовано два фундаментальных тома «Определителя кристаллов», включающих все тетрагональные, гексагональные и тригональные кристаллы в количестве около 1800 веществ.⁸

⁸ Определитель кристаллов. Кристаллы средних сингоний, ч. 1 и 2. Под ред. проф. А. К. Болдырева и проф. В. В. Доливо-Добровольского. Составили: А. К. Болдырев, В. В. Доливо-Добровольский, И. И. Шафрановский, В. Ф. Алявдин, Ю. П. Преображенский, Е. Е. Флинт, А. Н. Лямина, В. А. Аншлес, М. Н. Балашова, Н. Ю. Икорникова, В. И. Михеев, Э. Ф. Рунке, Г. М. Доливо-Добровольская, Г. Б. Бокий, А. М. Болдырева, Н. Н. Стулов, В. С. Соболев, Ю. А. Шнейдер и др. ГОНТИ, 1937—1939.

Описанный метод А. К. Болдырева представляет предельное упрощение федоровского кристаллохимического анализа. Неоднократно проведенная проверка «Определителя» на практике, в которой принимали участие, помимо составителей, группы студентов Горного института, дала самые благоприятные результаты. Ряд веществ, переданных химиками и минералогами, был определен безошибочно.

В 1938 г. с помощью «Определителя кристаллов» было обнаружено присутствие оловянной руды — касситерита — в россыпях на Урале. Образцы кристаллов касситерита в течение долгих лет хранились в коллекции академика П. В. Еремеева, переданной после его смерти в музей Ленинградского горного института. Согласно сопровождавшей их записке, они были ошибочно отнесены к кристаллам другого минерала — рутила. Крупные специалисты-минералоги, просматривая эти образцы, не разгадали их истинной природы. В 1938 г. на практических занятиях по гониометрии одному из студентов удалось при помощи федоровского гониометра и «Определителя кристаллов» установить принадлежность этих образцов к оловянному камню. Нет надобности говорить, какой большой интерес имело это открытие. Важно подчеркнуть необычный его характер: касситерит был открыт вдалеке от месторождения, на студенческих практических занятиях по кристаллографии, с помощью федоровского гониометра.

Идея Е. С. Федорова положить в основу определения кристаллического вещества его внешней геометрию натолкнула А. К. Болдырева на мысль использовать с той же целью внутреннюю геометрию кристалла, т. е. его структуру. Эта задача решается с помощью рентгеновских лучей.

При многих наших заводах и научно-исследовательских институтах существуют прекрасно оборудованные рентгеновские лаборатории. В них часто пользуются так называемым «методом порошка» в целях определения вещества. Исследуемый кристаллический материал измельчается в порошок и спрессовывается в небольшой столбик диаметром около 1 мм. Через этот столбик пропускают узкий пучок рентгеновских лучей с определенной длиной волны. Целые конусы рентгеновских лучей, отраженных от плоских сеток многочисленных и различно

ориентированных зерен порошка, улавливаются фотографической пленкой, окружающей в виде цилиндра исследуемый объект. В пересечении с цилиндрической фотопленкой такие конусы дают характерные симметричные линии (дужки). Фотопленка с дужками называется «порошкограммой». Каждому кристаллическому веществу соответствует своя характерная порошкограмма — нечто вроде своеобразного портрета его структуры. Эти-то «портреты» А. К. Болдырев и предложил принять за эталоны, по которым можно узнать «оригинал портрета», т. е. вещество кристаллического материала.

Для реализации идеи Болдырева надо было создать специальный «Рентгенометрический определитель», содержащий сводку имеющихся данных по рентгенограммам, принятым за эталонные.

Энтузиастом нового метода и главным создателем такого определителя явился ученик А. К. Болдырева, талантливый представитель федоровской школы в советской кристаллографии проф. В. И. Михеев (1912—1956). Большую часть своей жизни он посвятил этому трудоемкому делу. Недавно (уже после безвременной смерти В. И. Михеева) увидел свет созданный им монументальный «Рентгенометрический определитель минералов», содержащий данные для 900 с лишним веществ. Всегда следует помнить о преемственной связи этого нового определителя с гониометрическим «Определителем кристаллов» А. К. Болдырева и «Царством кристаллов» Е. С. Федорова. Федоровский обширный фолиант является как бы дедом, болдыревские два тома — его детьми, а михеевский труд — родным внуком «Царства кристаллов».

В «Рентгенометрическом определителе» нашла свое современное воплощение идея Федорова об определении вещества по геометрическим константам кристаллов. Однако определение ведется здесь не по внешним формам, а по внутренней геометрии — структурным особенностям вещества. «Рентгенометрический определитель минералов» — это новая форма федоровского «Царства кристаллов», основанная на новейших достижениях науки.

НОВАЯ ГЕОМЕТРИЯ

Изучение научного наследия Федорова показывает, что, оставаясь прежде всего кристаллографом, Евграф Степанович в то же время по складу своего ума был ярко выраженным геометром. Красной нитью через всю его жизнь проходит страстное увлечение геометрией. Не случайно первой большой работой ученого была монография «Начала учения о фигурах», законченная еще в пору, когда он был студентом; последние его труды также посвящены геометрии. Геометрия — это фундамент, на котором покоится величественное здание, воздвигнутое Федоровым в науке.

В самом деле, исходя из своих геометрических построений, Евграф Степанович разработал классификацию кристаллических многогранников и теорию строения кристаллов.

В тесной связи с геометрией стоят и вопросы из области химической и физической кристаллографии. Даже в описательных статьях, касающихся усложненных и несовершенных кристаллических образований или оптических свойств минералов и искусственных соединений, сказывается все то же стремление подчинить наблюдаемые факты геометрическим законам, объяснить их сущность геометрической теорией строения кристаллов. Во всем ярко проявляется любимый федоровский принцип: «Венец сознательной деятельности человеческого разума — решение стоящих перед ним вопросов путем математического анализа».

Геометрически разрешил Федоров и теоретические вопросы минералогии и науки о горных породах — петрографии. Этот же метод использовал он и при разработке задач, относящихся к горному делу.

В последний период своей деятельности ученый с особым увлечением разрабатывал вопросы новой геометрии. Свои занятия в этой области он рассматривал как своеобразный отдых, как необходимое отвлечение от повседневных трудов и забот. Федоров не раз сталкивался с трудностью изображения на плоскости таких сложных пространственных фигур, как кристаллические многогранники и кристаллические решетки. В связи с этим он особенно охотно занимался проективными методами новой геометрии, дающими возможность получать точные плоскостные изображения пространственных тел. Мало того, приемы, разработанные им, позволяют представить графическим путем составы сложнейших химических соединений, в том числе и минералов. Они же помогают определять углы падения и простирания пластов горных пород.

Чисто теоретические выводы в области геометрии Евграф Степанович всегда стремился использовать практически, применяя их и в кристаллографии, и в петрографии, и в химии, и даже в горном деле. Однако этим не исчерпываются работы Федорова по новой геометрии. Все его помыслы были устремлены к широчайшим теоретическим обобщениям. Именно поэтому его особенно привлекало учение о системах различных геометрических образов. Как известно, основным элементом в эвклидовой геометрии является точка. Из точек мы строим все остальные образы — линии, поверхности, пространственные фигуры. Так, например, прямая линия представляет бесконечную совокупность точек. При этом любые две точки, принадлежащие данной прямой, вполне определяют положение этой прямой на плоскости или в пространстве. В этом смысле элементарная геометрия — геометрия древних — является дисциплиной, имеющей дело лишь с единственной геометрической системой — системой точек. Однако вместо точки можно выбрать в качестве основного элемента какой-нибудь другой геометрический образ, например отрезок прямой с определенным направлением (вектор). Возьмем два параллельных отрезка AA' , BB' , имеющих одно и то же направление, указанное на рисунке стрелками (рис. 35). Точки A и B являются начальными точками обоих наших векторов, а A' и B' — их конечными точками. Соединим прямой AB начальные точки A и B и прямой $A'B'$ конечные точки A' и B' . Можно представить себе бесконечное множество векторов, па-

параллельных AA' и BB' , все начальные точки которых также лежат на прямой AB , а конечные точки — на прямой $A'B'$, как и у обоих исходных векторов AA' и BB' . В точке C , являющейся точкой пересечения прямых AB и $A'B'$, имеем точечный вектор. Вправо от C располагаются параллельные векторы той же системы, но противоположного направления. С удалением от точки C размеры векторов, входящих в нашу систему, бесконечно возрастают. Федоров такую систему назвал «примой параллельных векторов». Прямая линия однозначно определяется двумя любыми ее точками; подобным же образом описанная нами «прима» вполне определяется двумя любыми ее векторами. Следовательно, эта система аналогична прямой с той лишь разницей, что прямая построена из точек, т. е. является, по терминологии Федорова, «точечной примой», разобранный же выше система состоит из параллельных векторов, являясь «примой параллельных векторов».

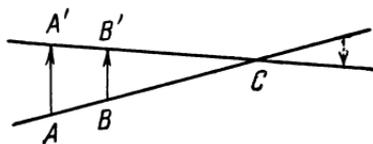


Рис. 35. Прима параллельных векторов.

Как известно, в элементарной геометрии три точки определяют плоскость. Аналогично взяв, помимо двух параллельных векторов, входящих в приму, какой-либо третий параллельный вектор, лежащий вне этой примы, можно построить систему параллельных векторов, как бы соответствующую обычной плоскости. По терминологии Федорова, такая система называется «секундой параллельных векторов». (Обычная плоскость, по Федорову, будет «точечной секундой»). Как видим, наподобие элементарной геометрии, являющейся геометрией точек, можно создать до известной степени аналогичную ей «геометрию параллельных векторов». В элементарной геометрии мы имеем точки, линии, поверхности, пространственные тела, здесь им соответствуют «элементы», «примы», «секунды», «терции», построенные из параллельных векторов. Иначе говоря, и в том, и в другом случае у нас будут основные элементы и их бесконечные совокупности первой, второй и третьей степени. Вместо параллельных векторов можно взять в качестве элементов и другие геометрические образы: круги, шары, лучи, плоскости, па-

раболы и т. д. Для них также можно построить аналогичные системы первой, второй и третьей степени — примы, секунды, терции. Таким образом, получим соответственные геометрии кругов, шаров, лучей, плоскостей, парабол и т. д.

Отметим существенное отличие новой геометрии от геометрии древних. Элементарная геометрия, имея дело с линиями, поверхностями и пространственными фигурами, не выходит за пределы трех измерений (длины, ширины и высоты), тогда как в новой геометрии могут быть системы четырех, пяти и т. д. измерений. Так, например, система параллельных векторов в пространстве является четырехмерной. В самом деле, из любой точки пространства можно провести параллельно данному направлению бесконечное множество векторов, отличающихся друг от друга по своей длине. Число таких векторов соответствует бесконечности первой степени. Число же точек в пространстве отвечает бесконечности третьей степени. Следовательно, количество параллельных векторов, которые можно провести в пространстве, равно бесконечности четвертой степени. Ограничившись лишь параллельными векторами, находящимися на плоскости чертежа, получим бесконечность третьей степени (терцию), т. е. совокупность векторов, соответствующую порядку совокупности точек пространства. Отсюда следует, что точки пространства можно изображать на плоскости с помощью параллельных векторов. При этом длина векторов будет давать представление о расстоянии между изображенными точками пространства и плоскостью чертежа. Направление стрелок векторов покажет, находятся ли изображаемые точки выше или ниже плоскости чертежа. В частности, точки, лежащие на самой плоскости чертежа, изобразятся точечными векторами, т. е. совпадут сами с собой. Такой прием, как увидим дальше, можно использовать, например, для изображения на плоскости атомов, ионов и молекул, слагающих структуры кристаллов.

Тем же путем, пользуясь системой параллельных векторов в пространстве, можно изобразить четырехкомпонентный состав сложного химического соединения.

Отметим еще одну основную особенность новой геометрии. В геометрии древних всякая теорема относится лишь к системе, построенной из точек, тогда как построе-

ния и теоремы новой геометрии одинаково приложимы ко всем без исключения геометрическим системам.

Элементарная геометрия, касаясь только одной частной системы — системы точек, является тем самым лишь частью новой геометрии. «Так как каждая теорема новой геометрии одинаково справедлива для всех систем одной и той же степени, то эту дисциплину в отношениях ее с геометрией древних можно сопоставить как алгебру в отношении к арифметике»,¹ — писал Евграф Степанович. Для гения Федорова эта область математики представляла широчайший простор. «Дайте нам новую теорему, и мы выведем из нее бесконечное множество других!» — утверждал он.

В новой геометрии различают две области. Одна из них — проективная геометрия, изучающая геометрические образы с помощью методов проектирования. Вторая является учением о системах различных геометрических образов.

Федоров усиленно разрабатывал одновременно как методы проективной геометрии, так и учение о системах разных геометрических образов. При этом он не ограничивался системами, созданными до него другими учеными (например, системами лучей, плоскостей, шаров), а создавал свои собственные, новые, оригинальные системы.

Совершенно самостоятельно им были целиком разработаны геометрия векториальных кругов, геометрия векториальных шаров и геометрия параллельных векторов.² Наиболее крупным его трудом в этой области является изданная в 1907 г. книга «Новая геометрия, как основа черчения». Эта обширная монография составлена по материалам лекций, которые Евграф Степанович читал в Горном институте. Задуманная как учебное пособие, она содержит прежде всего изложение основ новой геометрии. Однако помимо этого, в ней имеется множество совершенно оригинальных положений, целиком принадлежащих Федорову. Конечно, этот замечательный труд нельзя считать простым учебником. Он представляет собой богатейший и блестящий вклад в науку. Между прочим, уже в этой книге Евграф Степанович установил несколько

¹ Е. С. Федоров. Основные черты новой геометрии. Зап. Горн. инст., 1912, т. III, вып. 5, стр. 383.

² Векториальными кругами и шарами называются такие круги и шары, которым приданы определенные направления.

новых геометрических систем. Кроме того, здесь даны основы изумительно стройной федоровской номенклатуры бесконечных совокупностей геометрических элементов. Именно в этой книге ученый по аналогии с точкой, линией, поверхностью, пространством элементарной геометрии (т. е. геометрии точек) ввел следующие общие для геометрии любых образов термины: «элемент», «прима», «секунда», «терция». Он продолжил этот ряд и для геометрии высших измерений. Такие неточные и неуклюжие термины, как «пространство четырех измерений», «пространство пяти измерений», «пространство шести измерений» и т. п., заменены здесь краткими терминами: «кварта», «квинта», «секста» и т. д.

В своих позднейших многочисленных статьях Евграф Степанович продолжал развивать и совершенствовать различные главы новой геометрии. Среди этих статей мы найдем и такие, которые относятся собственно к проективной геометрии, и работы, посвященные созданию и изучению новых геометрических систем, и др.

Особенное значение имеют для нас статьи, касающиеся практического приложения новой геометрии. К числу таких прежде всего нужно отнести большую работу, трактующую вопрос о точном изображении точек пространства на плоскости.³ Труд этот нашел практическое приложение в разнообразных областях, начиная от физической химии и кончая маркшейдерским делом. Ясно, что методы новой геометрии вообще и проективной геометрии в частности Федоров в первую очередь стремился использовать в целях развития своей излюбленной науки — науки о кристаллах.

Рассматривая элементарную геометрию как часть новой геометрии, Евграф Степанович тем самым трактовал и вопросы математической кристаллографии как детали одного общего геометрического здания. С этой именно точки зрения Федоровым разработано учение о симметрии. «Симметрия есть частный случай проективности, относящейся здесь к области Новой геометрии», — писал он. Иногда бывает даже трудно отделить работы Евграфа Степановича, относящиеся к собственно кристаллографии и собственно геометрии. И те и другие сплошь и рядом сливаются у него в одно стройное целое.

³ Е. С. Федоров. Точное изображение точек пространства на плоскости. Зап. Горн. инст., т. I, вып. 1, 1907.

Следует остановиться на применении новой (проективной) геометрии к разрешению практических задач кристаллографии. В этом отношении особый интерес представляет статья «Изображение структуры кристалла векториальными кругами» (1908). В ней Федоров описывает новый метод изображения кристаллических решеток при помощи векториальных кругов, т. е. таких кругов, которым приданы определенные направления. Эти направления могут быть обозначены стрелками. В результате получаем круги двух видов: с направлениями по часовой стрелке и против часовой стрелки. Первые могут быть использованы для изображения точек, лежащих выше плоскости проекции, тогда как вторые соответствуют точкам, лежащим ниже этой плоскости. Радиусы самих кругов дают понятие о степени удаленности изображаемых узлов решетки от плоскости проекций.

В настоящее время понятие о кристаллических структурах в результате их изучения рентгеновскими лучами значительно усложнилось. Вот почему теперь особенно важно уметь изображать при помощи плоскостных проекций пространственное положение атомов внутри кристаллов. Эта задача была успешно разрешена академиком А. Н. Заварицким, применившим федоровский метод к изображению реальных кристаллических структур.⁴

В чем же заключается, вкратце, сущность метода, предложенного Федоровым и развитого Заварицким?

Представим себе центры атомов, слагающих кристаллические структуры, в виде точек, закономерно расположенных в пространстве. Необходимо иметь в виду, что для изображения этих точек на плоскости мы не можем воспользоваться точками же. Дело в том, что совокупность точек пространства представляет собой бесконечность третьей степени, тогда как совокупность точек на плоскости соответствует бесконечности второй степени. Тем самым точки плоскости не могут служить элементами, однозначно изображающими точки пространства. Ими могут быть только такие геометрические образы, совокупность которых на плоскости составляет бесконечность третьей степени, аналогичную совокупности точек пространства. Выше уже говорилось о том, что для плоскостного изображения точек

⁴ А. Н. Заварицкий. Об изображении атомных структур минералов. Изв. АН СССР, 1949, № 6, стр. 141—165.

пространства можно воспользоваться параллельными векторами. Однако применяя векторы, мы вносим в изображение направления, произвольно приданные векторам, и тем самым нарушаем на проекции симметрию, имеющую место в расположении атомов внутри кристаллических построек. Поэтому гораздо удобнее применить здесь векториальные круги, т. е. круги с определенными направлениями.

Процесс проектирования кристаллических структур с помощью векториальных кругов сводится к следующему. Прежде всего выбирается плоскость проекции. Изображаемые точки пространственной фигуры, т. е. в нашем случае — центры атомов кристаллической структуры, проектируются на эту плоскость взаимно параллельными линиями, перпендикулярными плоскости проекции. Из полученных точек проекции строятся круги с диаметрами, равными расстояниям изображаемых атомов от плоскости проекции. Для отличия атомов, лежащих выше и ниже плоскости проекции, можно было бы использовать круги с направлениями по часовой стрелке и против нее. Однако согласно А. Н. Заварицкому, вместо этого удобнее изображать круги для атомов, лежащих выше плоскости проекции, жирными линиями, а для атомов, находящихся под плоскостью проекции, — тонкими линиями. Точки, совпадающие с плоскостью проекции, изображаются точками (т. е. «точечными кругами»).

Рассмотрим сперва в качестве пояснения простой пример, приведенный в статье акад. А. Н. Заварицкого. Пусть требуется спроектировать четыре точки A, B, C, D , расположенные в пространстве по вершинам тетраэдра (рис. 36). Плоскость проекции P проведем через центр этого тетраэдра. Для того чтобы спроектировать точки A, B, C, D , опускаем из них перпендикуляры AA', BB', CC', DD' на плоскость P . В результате получаем на плоскости проекции четыре точки A', B', C', D' . Из этих точек, как из центров, вычерчиваем круги с диаметрами, равными расстояниям AA', BB', CC', DD' . Вследствие того, что точки A и B находятся над плоскостью проекции, круги вокруг точек A' и B' следует изображать более толстыми линиями. Круги, соответствующие нижним точкам C и D , изображаются тонкими линиями. Полученная таким образом проекция и представляет собой изображение точек A, B, C, D векториальными кругами.

Пользуясь таким методом, в 1914 г. Федоров, исходя из данных рентгеноанализа, изобразил расположение атомов в структурах алмаза, пирита (FeS_2), кальцита (CaCO_3). Такое изображение он называл «диаграммами структур».

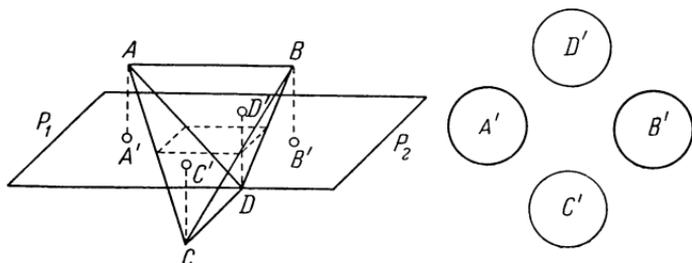


Рис. 36. Изображение точек A, B, C, D векториальными кругами.

К сожалению, смерть помешала ему продолжить и развить эти работы. Впоследствии А. Н. Заварицкий дал в своих работах изображения структур для значительного числа минералов. Приведем в качестве иллюстрации изображе-

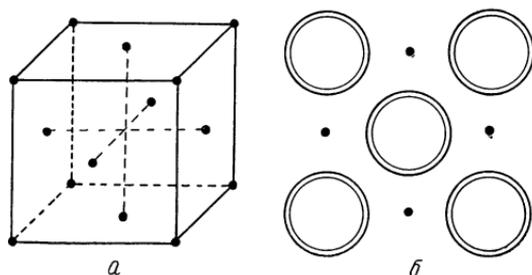


Рис. 37. Структура меди (а) и ее изображение векториальными кругами (б).

ния простейших структур, спроектированных с помощью векториальных кругов.

На рис. 37, а изображена элементарная ячейка структуры типа меди.⁵ Как видно из рисунка, структура меди

⁵ Элементарной ячейкой называется некоторая мельчайшая часть структуры в форме параллелепипеда. Путем параллельных переносов такого параллелепипеда вдоль его ребер на расстояния, равные длинам ребер, получается целиком вся бесконечно протяженная структура.

(а также золота, серебра и платины) соответствует кубической центрогранной решетке: атомы расположены здесь по вершинам кубической ячейки и в центрах ее граней.

Рис. 37, б представляет проекцию такой структуры векториальными кругами. Плоскость проекции взята перпендикулярно одной из четверных осей элементарной ячейки. Центр проекции, т. е. точка внутри ячейки, через которую проходит плоскость проекции, совмещена с центром самой ячейки. Пять атомов, лежащих в плоскости верхней

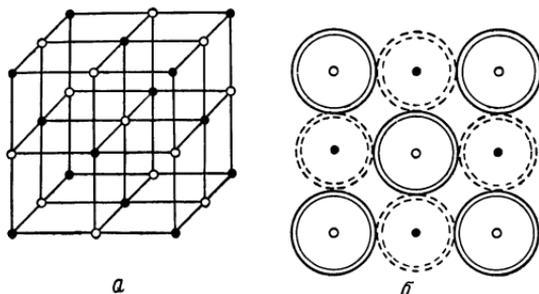


Рис. 38. Структура каменной соли (а) и ее изображение векториальными кругами (б).

грани кубической ячейки, должны быть изображены пятью кругами.

Такие же пять атомов находятся и в плоскости нижней грани ячейки, как раз под верхними атомами. Поэтому круги следует изображать двойными линиями. Каждый круг с двойной линией изображает сразу два атома, находящиеся друг под другом. Диаметры кругов равны половине ребра ячейки, так как атомы, лежащие в верхней и нижней гранях ячейки, удалены от плоскости проекции на расстояния, равные половине высоты всей ячейки. Четыре атома, находящиеся в середине четырех вертикальных граней ячейки, совпадают с самой плоскостью проекции. Следовательно, они должны изображаться точками (т. е. точечными кругами).

На рис. 38, а, б изображена элементарная ячейка поваренной соли (NaCl) и ее проекция векториальными кругами. Эта структура является уже более сложной, так как в состав ее входят ионы двух сортов — натрия и хлора. Поэтому на проекции круги изображаются сплошными линиями (ионы натрия) и прерывистыми линиями (ионы

хлора). На рис. 38, а видно что отдельно взятые ионы Na образуют в структуре поваренной соли как бы свою отдельную центрогранную решетку. Поэтому на проекции (рис. 38, б) круги со сплошными линиями и черные точечные кружки, изображающие атомы натрия, в точности дублируют круги и точки на изображении структуры меди (рис. 37, б). Между ними изображаются круги с прерывистыми линиями и белые точечные кружки, показывающие ионы хлора.

Практическое значение метода, предложенного Федоровым, чрезвычайно велико. «В настоящее время одной из самых важных задач минералогии является выяснение того, как минералы построены из атомов, и наши знания в этом отношении все возрастают, — пишет академик А. Н. Заварицкий. — С атомной структурой связываются химические и физические свойства минералов, и, что особенно важно, знание этой структуры позволяет понимать связь химических и физических свойств. . . Нет надобности доказывать, что когда в минералогии перед нами как основная задача встала необходимость представлять, каким образом минералы построены из атомов, — способ однозначного изображения расположения атомов при помощи проекций на плоскости, достаточно наглядно и, главное, однозначно представляющий это расположение, становится предметом исключительной важности».⁶

Задачи новой геометрии, разработанные Федоровым более сорока лет тому назад, с каждым днем приобретают все большую актуальность. Это справедливо не только в отношении приложения новой геометрии к практическим запросам кристаллографии. В последнее время возрастает интерес к геометрическим работам Федорова также со стороны специалистов-горняков, физико-химиков, петрографов и др. Достижения Федорова в области новой геометрии продолжают и сейчас играть важную роль, а многие из них еще ждут своего дальнейшего развития и применения.

⁶ А. Н. Заварицкий. Об изображении атомных структур минералов, стр. 141.

ТРИУМФ НАУЧНОГО ПРЕДВИДЕНИЯ. ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ

Величайшим торжеством идей Федорова явились два замечательных научных события. В 1912 г. немецкий физик Лауэ установил дифракцию рентгеновских лучей в кристаллах. В следующем, 1913 г., английские ученые В. Г. и В. Л. Брэгги (отец и сын) дали первые расшифровки кристаллических структур на основе рентгеноанализа.

Напомним, что в 1895 г. В. К. Рентген (1845—1923) открыл невидимые лучи, отличающиеся целым рядом поразительных свойств. Подчеркивая загадочность природы нового излучения, сам Рентген называл открытые им лучи «*x*-лучами» (сейчас они носят имя своего первооткрывателя). Действительно, долгое время опыты, проводимые с целью выяснения природы найденных лучей, не давали определенных результатов. Физики разбились на два враждующих лагеря. Одни рассматривали рентгеновское излучение как поток движущихся частиц (корпускул), другие приписывали ему наравне со световыми лучами волновую природу.

Чтобы установить тождественность природы рентгеновских лучей со световыми, необходимо было обнаружить для первых явления отражения, преломления и т. д. Однако долгое время это не удавалось. Приборы, применявшиеся исследователями, были слишком грубыми для новооткрытых лучей, длины волн которых, как нам сейчас известно, в среднем в 10 000 раз короче длин волн видимых лучей.

Макс Лауэ высказал плодотворную мысль воспользоваться для исследования рентгеновских лучей кристаллами. Следует отметить, что его открытию очень способствовала благоприятная научная обстановка в Мюнхене того времени.

В своих воспоминаниях Лауэ пишет об этом следующее: «Особенное значение для меня имело то, что в Мюнхене была еще жива традиция исследования пространственной решетки кристаллов, о которой едва ли вспоминали где-нибудь в другом месте. Это объяснялось отчасти тем, что до 1897 г. в Мюнхене работал Леонард Зонке, который много сделал для математической обработки этой проблемы. В коллекциях университетского института можно было видеть модели решеток. Большая заслуга принадлежит также минералогу Паулю Гроту, который в своих лекциях постоянно говорил о решетках».¹

Итак, значительную роль сыграл здесь уже знакомый нам П. Грот, энергичнейший поборник теории решетчатого строения кристаллов, а вместе с тем и горячий поклонник и популяризатор трудов Е. С. Федорова. Напомним кстати, что и сам Евграф Степанович был членом Мюнхенской (Баварской) академии наук. Господствовавшие здесь воззрения позволили Лауэ высказать предположение о соизмеримости длин волн рентгеновских лучей с расстояниями между элементарными частицами в кристаллических решетках.

Из оптики известно явление дифракции лучей. Оно заключается в том, что лучи, проходя сквозь отверстия, диаметры которых соизмеримы с длинами волн, отклоняются от своего первоначального направления.

Согласно своей гипотезе, для исследования рентгеновских лучей Лауэ предложил воспользоваться кристаллами как естественными дифракционными решетками. Схема опыта, осуществленного по его мысли В. Фридрихом и Г. Книппингом, сводилась к следующему: узкий пучок рентгеновских лучей пропускался сквозь кристалл и отпечатывался на фотографической пластинке, помещенной за кристаллом. При проявлении такой пластинки была обнаружена серия пятен, соответствующих отклонившимся лучам. По их расположению можно судить о симметрии того направления в кристалле, вдоль которого проходил пучок рентгеновских лучей. Процесс отклонения лучей от первоначального их пути можно уподобить отражению этих лучей от плоских сеток кристалла, т. е. плоскостей, усаженных элементарными частицами (атомами),

¹ М. Лауэ. История физики. Гос. изд. техн.-теорет. лит., М., 1956, стр. 185.

слагающими кристаллическое тело. Наиболее яркие пятна фотографии соответствуют при этом плоским сеткам, густо покрытым частицами.

Опыт Лауэ дал возможность судить о пространственном расположении плоских сеток и частиц внутри кристалла, т. е. как бы открыл лазейку в его внутреннюю структуру. Мало того, этот знаменитый опыт по сути дела сразу «убил трех зайцев». Во-первых, он доказал волновую природу рентгеновских лучей и тем самым дал начало новому разделу физики — так называемой «физике рентгеновских лучей». Во-вторых, он впервые показал воочию реальность кристаллической решетки и позволил исследователям нащупывать атомы внутри кристаллической структуры. Зародилась новая наука, о которой так мечтал Е. С. Федоров, — рентгеноструктурный анализ кристаллов. Наконец, этот опыт продемонстрировал правильность предположения Лауэ о соизмеримости длин волн рентгеновских лучей с расстояниями между элементарными частицами в кристаллических структурах.

Открытие Лауэ произвело огромное впечатление на Евграфа Степановича. Он воспринял его с чувством торжества и глубокого удовлетворения. Всю жизнь ученый мечтал перейти к экспериментальным исследованиям вопроса о расположении частиц и атомов твердого тела, проверить на опыте математически выведенные им законы. И вот, наконец, появились опытные данные, подтверждающие его теоретические предсказания.

В письме Е. С. Федорова, адресованном старинному другу, бывшему шлиссельбургскому узнику, революционеру, ученому и поэту Н. А. Морозову, содержится яркая характеристика замечательного открытия.

1912 X 2

Глубокоуважаемый Николай Александрович.

Ваше письмо кончается словами о том, что человеческий глаз никогда не увидит атомов. Вы писали его приблизительно в то время, когда люди увидели атомы собственными глазами, если не сами атомы, то вызванные ими фотографические изображения.

Как это достигнуто? Очень просто. Делительной машиной мы можем на стекле провести тысячу параллельных прямых на толще одного миллиметра;

это будет дифракционная решетка, которая дает ряд чудных дифракционных спектров, и по этим спектрам легко различать число делений на стекле.

Но тонкая кристаллическая пластинка сама по себе представляет две пересекающиеся дифракционные решетки, в которых линии проведены не на тысячных, а на десятиллионных частях миллиметра.

Световые волны слишком грубы, чтобы дать дифракционные спектры. Но имеются лучи Рентгена, длина волн которых в миллионы раз меньше, чем световых.

И вот несколько недель тому назад в лаборатории Рентгена такие дифракционные спектры от атомов были сфотографированы через посредство лучей Рентгена. Косвенно люди увидели непосредственный эффект, вызываемый атомами, то есть, в сущности, собственными глазами увидели атомы.

Для нас, кристаллографов, это открытие первоклассной важности, потому что теперь впервые с полной наглядностью воспроизведено то, что нами лишь теоретически клалось в основу представления о структуре кристаллов, на чем, в частности, основан и кристаллический анализ.

Полагаю, что Вам будет очень приятно узнать об этом.

Сердечный Вам привет от меня и всей семьи.

Е. Федоров.²

Возвращаясь к открытию Лауэ в популярной статье, написанной для журнала «Природа», Е. С. Федоров пишет: «Удавшиеся фотографические воспроизведения Лауэ произвели на ученый мир ошеломляющее впечатление. Появился новый метод ощупывания атомов».³

Еще большее торжество принес Евграфу Степановичу 1913 год, когда появились первые расшифровки реальных кристаллических структур, осуществленные В. Г. и В. Л. Брэггами с помощью рентгеноанализа. Эти работы сразу же вызвали живой отклик Е. С. Федорова.

² И. И. Шафрановский и Н. М. Раскин. Рукописные материалы Е. С. Федорова в Архиве АН СССР. Тр. Архива АН СССР, вып. 14, Изд. АН СССР, 1957, стр. 140.

³ Е. С. Федоров. Первые шаги в деле распознавания атомов в кристаллах. Природа, 1915, март, стб. 344.

В статье «Первое констатирование опытным путем асимморфной правильной системы» (1914 г.) Федоров подчеркивал принадлежность всех расшифрованных структур к выведенным им за двадцать два года до этого системам правильных систем точек, подчиняющихся 230 геометрическим законам симметрии.

Статья открывается следующими словами: «Применение рентгеновских лучей дало в руках В. Л. Брэгга (и его отца) средства привести к заключениям, чрезвычайно важным для теории структуры кристаллов. Отчасти эти заключения неожиданны, по крайней мере в том отношении, что ожидалось видеть в точках правильных систем центры химических частиц, тогда как опыты названного ученого привели к выводу, что это центры атомов. Благодаря этому в веществах простейшего химического состава получают и специальные правильные системы точек, причем центры симметрии заняты отдельными атомами».⁴

Далее Федоров указывает на свой вывод пространственных групп и на его недооценку учеными кругами того времени: «Не могу воздержаться от заявления, что я никак не думал дожить до действительного определения расположения атомов, предусмотренных в указанных моих сочинениях. В письме к проф. Гроту я писал, что пожалуй детальные применения систем, предусмотренных в этих сочинениях, начнут совершаться еще через 100 лет.

«В 1891 году упомянутое русское сочинение, предусматривающее возможные расположения атомов, или, скорее, законы этих расположений, я представил в И. СПб Академию наук на соискание Макарьевской премии того года, но оно не только не удостоилось самой премии, но найдено не заслуживающим упоминания и даже не попало в длинный официальный список работ, представленных на соискание этой премии».⁵

В популярной статье, опубликованной на страницах широко распространенного журнала «Природа», Федоров еще раз подчеркивает значение своих геометрических работ по теории структуры кристаллов: «Нельзя не считать

⁴ Е. С. Федоров. Первое констатирование опытным путем асимморфной правильной системы. Зап. Горн. инст., т. 5, 1914, стр. 54—56.

⁵ Там же, стр. 56.

великим завоеванием человеческого ума то обстоятельство, что он и до открытия этих способов привел к перечислению всех вообще возможных расположений (элементарных частиц в кристалле); но то, что было сделано до сих пор, было лишь введением в новую область, экспериментальным методом которой теперь положено твердое основание... Свойства рентгеновских лучей дают возможность экспериментальной проверки тех главных особенностей в расположении атомов в кристаллах, которые давно были установлены кристаллографами». ⁶

Приведем еще один отрывок, в котором ученый развивает те же мысли: «Уже теперь, однако, можно сказать, что этот метод (метод Брэггов) санкционировал экспериментально те теоретические выводы и построения, которые были сделаны до его появления, так что все пока полученные результаты входят в рамки возможных структур, предусмотренных раньше, а для этих структур были выработаны методы простейшего их выражения и изображения». ⁷

Справедливость этих высказываний впоследствии полностью подтвердилась. Без преувеличения можно сказать, что современный успех рентгеноструктурного анализа — результат того, что задолго до его возникновения уже имелась математическая теория структуры кристаллов, созданная, в основном, трудами Е. С. Федорова.

Вместе с тем Евграф Степанович в своих статьях усиленно подчеркивал и все то новое и подчас неожиданное, что удавалось обнаружить с помощью эксперимента. Особенно поразительным явилось открытие, согласно которому кристаллы неорганических соединений построены не из молекул, а из отдельных атомов. Элементом кристаллической структуры явился атом, а не молекула, вопреки прочно укоренившимся воззрениям химиков, а также и самого Федорова. В связи с этим пришлось ввести соответственные поправки и в представления о строении кристаллов. «Теория, которая была положена в основу кристаллохимического анализа, — писал по этому поводу Евграф Степанович, — исходила из допущения, что на

⁶ Е. С. Федоров. Первые шаги в деле распознавания атомов в кристаллах, стб. 339.

⁷ Е. С. Федоров. Результаты первой стадии экспериментального исследования структуры кристаллов. Изв. АН, 1916, стр. 360.

кристаллическое вещество можно смотреть как на одну единственную пространственную решетку, узлы которой представляют центры тяжести некоторой группы атомов, представляющих собой кристаллическую частицу (молекулу). . . Исследование кристаллов x -лучами, с одной стороны, блестяще подтвердило все основные построения теории структуры кристаллов (чем дало яркое доказательство значения человеческого ума в области точного предвидения), но, с другой стороны, и заставило изменить некоторые из них, казалось бы, имеющие существенное значение. Оказалось, что на кристаллы никоим образом нельзя смотреть как на простые пространственные решетки частиц, так как каждый разряд атомов образует самостоятельные решетки и на опыте плотность расположения атомов оказалась более важным фактором, чем плотность расположения частиц».⁸

Приведенная цитата ярко свидетельствует о способности Федорова быстро и правильно реагировать на новые экспериментальные факты. В частности, под влиянием опытных данных ученому пришлось пересмотреть и свою прежнюю оценку выведенных им самим пространственных групп.

Осуществив в 1890 г. полный вывод 230 пространственных групп, Федоров, как уже указывалось выше, подразделил их на симморфные, гемисимморфные и асимморфные. По ряду соображений, вытекающих из учения о параллелоэдрах, ученый тогда предполагал, что асимморфные группы почти невозможны в природе. Однако ознакомившись с расшифровкой структуры пирита (серного колчедана), он увидел, что расположение атомов Fe и S в серном колчедане обуславливает асимморфную правильную систему точек. Опыт доказал реальное существование таких систем и Евграф Степанович сразу же отметил это обстоятельство в специальной статье. Начиная с 1914 г., Е. С. Федоровым была опубликована серия работ, посвященных выводам рентгеноанализа. В них великий кристаллограф дал свои истолкования полученных результатов.

В последних работах Федоров особенно часто касался химической стороны кристаллических структур. В 1916 г.

⁸ Е. С. Федоров. Предусматривание кристаллизации по расположению атомов. Зап. Горн. инст., 1917, № 6, стр. 161—163.

он впервые употребил термин «кристаллохимия».⁹ «Открылась новая область научного ведения — кристаллохимия, в которой методы химии и кристаллографии слились неразрывными узами. . . Со временем ее методы получают, конечно, большое разнообразие».¹⁰

В той же статье формулируется следующее положение: «Во всяком случае, изображение расположения атомов есть лучшая структурная и стереохимическая (т. е. пространственная) формула».¹¹

По поводу этого высказывания проф. Г. Б. Бокий пишет: «Какие замечательные слова! Даже сейчас, спустя 37 лет, не скажешь лучше. Теперь мы эту мысль иллюстрировали бы на примере пенициллина. Его структурная и стереохимическая формула была определена в 1950 году по данным рентгеноструктурного анализа».¹²

В федоровском архиве сохранились письма английского ученика Евграфа Степановича — Т. Баркера. В этих письмах находится много любопытных сведений о научных событиях того времени. В частности, описывается забавное недоразумение, произошедшее в кругах английских ученых. Оно объясняется тем, что во всеобщем мнении имя Федорова было теснейшим образом связано с расшифровкой кристаллических структур. Об этом подробно рассказано в письме Баркера от 15 ноября 1912 года: «Я только что послал Вам экземпляр „Новостей химии“ с моей статьей и пять отдельных оттисков этой статьи. Непосредственным поводом для статьи послужило следующее.

«Из пятидесяти препаратов, которые я послал Вам для испытания применимости Вашего метода кристаллохимического анализа, пять были доставлены мне Туттоном. На этом основании Туттон опубликовал месяца два тому назад в журнале „Природа“ статью. Из нее явствует, что Туттон не только не понимает полностью методики проведения этой работы, но, как будто, воображает даже, что его исследования изоморфных серий сыграли известную роль в ходе развития Вашего метода!

⁹ Г. Б. Бокий. Е. С. Федоров и кристаллохимия. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., т. 10, 1956, стр. 24.

¹⁰ Е. С. Федоров. Основной закон кристаллохимии. Изв. АН, 1916, стр. 453.

¹¹ Там же, стр. 447.

¹² Г. Б. Бокий. Е. С. Федоров и кристаллохимия, стр. 24.

«В другой статье, опубликованной позже в „Дейли Мэйл“, он описывает сразу и Ваш метод, и фотографирование пространственных решеток при помощи рентгеновских лучей. В статье все настолько перепутано, что сэр Оливер Лодж в своей лекции о последних достижениях естественных наук, прочитанной им в Химическом обществе, несколькими своими высказываниями показал, что под влиянием статьи Туттона он считает рентгенографическую работу и кристаллохимический анализ одним и тем же открытием! Это-то и побудило меня написать статью, которая показывает, что заслуга открытия метода кристаллохимического анализа принадлежит Вам одному, и что никто, кроме Вас, не принимал в этом деле никакого участия».¹³

Большой интерес представляет отрывок из письма Баркера от 7 января 1914 г.: «В течение двух последних месяцев я был занят составлением ежегодного доклада для Химического общества о работах по кристаллографии и минералогии. . .

«В докладе я особо рассматриваю Вашу работу о правильном выполнении пространства (в той степени, в какой вообще возможно писать о предметах такого рода для химиков, обладающих слабыми познаниями по кристаллографии), а также работу по рентгеновскому исследованию кристаллов. Последняя работа вызвала сенсацию в нашем научном мире. Не знаю, известны ли Вам уже новейшие теоретические выводы обоих Брэггов. Если Вас интересует их работа, я попрошу их послать Вам отписки статей».¹⁴

Получив от В. Л. Брэгга отписки его работ, Е. С. Федоров пишет следующее письмо:

Петербург, 15/25 января 1914 г.

Глубокоуважаемый Господин Брэгг!

Примите мою благодарность за присылку Ваших почтенных трудов. Я надеюсь, что в ближайшее

¹³ Письма Т. Баркера, Г. Майерса, Л. Спенсера и У. Брэгга к Е. С. Федорову. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 239.

¹⁴ Там же, стр. 243.

время Вы получите тоже «Правильное деление плоскости и пространства».

С глубоким уважением и преданностью

Е. С. Федоров.¹⁵

В федоровском архиве сохранилось два небольших письма В. Л. Брэгга. Первое содержит благодарность за присылку капитальной федоровской монографии «Правильное деление плоскости и пространства». Текст второго письма приводится полностью ниже.

Тринити-Колледж.

Кембридж, 17 февраля 1914 г.

Дорогой Сэр!

Я очень благодарен Вам за письмо, в котором Вы даете рекомендации относительно способов описания пространственного расположения точек. Я с тем большим интересом рассмотрел Ваш метод, что для меня бывает весьма трудно описать структуру после того, как я ее надлежащим образом изучу. Если уже существует признанный способ определения положений атомов в кристаллах, я был бы Вам весьма обязан, если бы Вы согласились сообщить мне его. Я попытаюсь описывать при помощи Вашего способа все те многочисленные кристаллы, с которыми мне приходится иметь дело, хотя они могут оказаться и чересчур сложными.

Преданный Вам В. Л. Брэгг.¹⁶

Совсем недавно Брэгг дал замечательную характеристику Е. С. Федорова в письме к советскому историку науки Г. Н. Кованько:

«Федоров был в то время для меня почти легендарной личностью, разработавшей 230 классов кристаллов. Немногие люди интересовались тогда кристаллографией. Тот интерес, который существовал в то время, был интересом к внешней форме кристаллов, а не к их внутренней

¹⁵ Н. В. Белов и И. И. Шафрановский. Роль Е. С. Федорова в предыстории рентгеноструктурной кристаллографии. Зап. Минералог. общ., т. ХСІ, вып. 4, 1962, стр. 470.

¹⁶ Письма Т. Баркера и др., стр. 249—250

структуре. Когда я начал анализировать кристаллы x -лучами, я ничего вообще не знал об их геометрии. Для нас было поистине удивительным открытием, что великие люди, подобные Федорову и Барлоу, которого я тоже знал, изучили внутреннюю геометрию кристаллов и дали твердое теоретическое обоснование нашей работе».¹⁷

В 1914 г. жизнь ученого нарушила первая мировая война. Евграф Степанович давно уже с беспокойством следил за бурным развитием надвигавшихся событий. По словам его биографа В. В. Никитина, он не был «к добру и злу постыдно равнодушен» и горячо реагировал на всякое насилие. Любая несправедливость возмущала его. В 1903 г., во время англо-бурской войны, Федоров в резкой форме отказался от почетного диплома и приглашения прочитать цикл лекций в Лондонском королевском обществе.

По всей России распространилось тогда известие об этом отказе. Московский корреспондент «Биржевых ведомостей» писал: «Е. С. Федоров — профессор Московского сельскохозяйственного института отказался от диплома Лондонского королевского общества, заявляя в письме, что не желает принимать любезности от нации, так бесчеловечно задавившей самостоятельность бурского народа».¹⁸ Ученый получил в то время целый ряд восторженных писем со всех концов России, в которых одобрялся его поступок.

Особенно беспокоил Евграфа Степановича чудовищный рост германского милитаризма. В одной из своих философских статей он даже пытался предсказать, исходя из строго логических предпосылок, его неминуемую гибель. «Германия как-то невольно заставляет вспомнить вооруженных игуанодонов и динозавров былых времен. Такие организации недолговечны», — писал он.¹⁹

¹⁷ Г. Н. Кованько. Из истории структурной кристаллографии. Зап. Всесоюзн. минералог. общ., 1955, ч. 87, вып. 6, стр. 675—676.

¹⁸ Т. Б. Седых. Е. С. Федоров — борец за материализм. Вопр. философии, 1954, № 3, стр. 153.

¹⁹ Е. С. Федоров. Природа и человек. Природа, 1917, № 4, стр. 430.

Мы знаем, что в юности Евграф Степанович принимал активное участие в революционном движении. Впоследствии, всецело посвятив себя науке, он не изменил своим прогрессивным взглядам и остался непримиримым врагом самодержавия. Выше уже приводились характерные в этом отношении факты из биографии ученого и соответствующие высказывания. В «Автобиографических записках», относящихся к 1915 г., Е. С. Федоров с возмущением пишет об угнетении народных масс, находящихся «под гнетом одичавшей администрации, держащей себя в положении завоевателей».

«Никогда истинный ученый не обратится к высшей государственной власти, преследующей хищнические интересы», — читаем мы в другом месте той же рукописи. Даже в ученой среде того времени он видит два мира: «людей идеала и людей казенщины». Ему бросалось в глаза, что «поощрение всегда оказывалось самым безнравственным элементом, а люди с чистыми помыслами подвергались преследованию».²⁰

В 1913 г. Е. С. Федоров в анкете популярного журнала «Огонек» «Ваш новогодний тост?» дал замечательный ответ, наглядно свидетельствующий об его гражданском мужестве.

Новогодний тост.

Желаю, чтобы пережитый исторический момент был переходным, чтобы отныне прекратился подбор, исключения свыше наиболее талантливых студентов, чтобы детей перестали делать политическими преступниками и развращать их в участках,²¹ чтобы мысли, неприятные для хищников, могли свободно высказываться в собраниях и в печати.

Е. С. Федоров.²²

²⁰ Е. С. Федоров. И[мператорская] П[стербургская] Академия наук. Автобиографические записки, воспоминания и характеристики. Архив АН СССР, Л., 831, оп. 1, № 22.

²¹ Очевидно, эта фраза относится к вызвавшим большое возмущение среди передовых слоев общества арестам и обыскам среди гимназистов, произведенным петербургской полицией в декабре 1912 г.

²² Е. С. Федоров. Новогодний тост. Публикация и примечания М. П. Шаскольской. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 51.

Крушение самодержавия в России и Великая Октябрьская социалистическая революция были встречены ученым с большой радостью. Рушился строй, при котором ему пришлось так много пережить и испытать, на его глазах претворялись в жизнь лучшие чаяния передового человечества. С восторгом приветствовал Евграф Степанович известие о поражении Германии и последовавшем там перевороте. По этому поводу он писал осенью 1918 г.: «Переживу ли я эту зиму, или нет (что часто мне представляется вероятным), я переживаю восторженное состояние, которое, по-видимому, разделяется всей нашей интеллигенцией. Явно на глазах у всех гибнет злейший враг человечества — немецкий милитаризм, о чем мы мечтали все эти годы. Такие громадные шаги в истории человечества, не повторяющиеся за время известной нам истории, не даются даром. Человечество платит за них миллионами жизней, голодом, болезнями, общим истощением. Если бы пришлось и умереть, все-таки сказал бы, что на мою долю выпало еще не много».²³

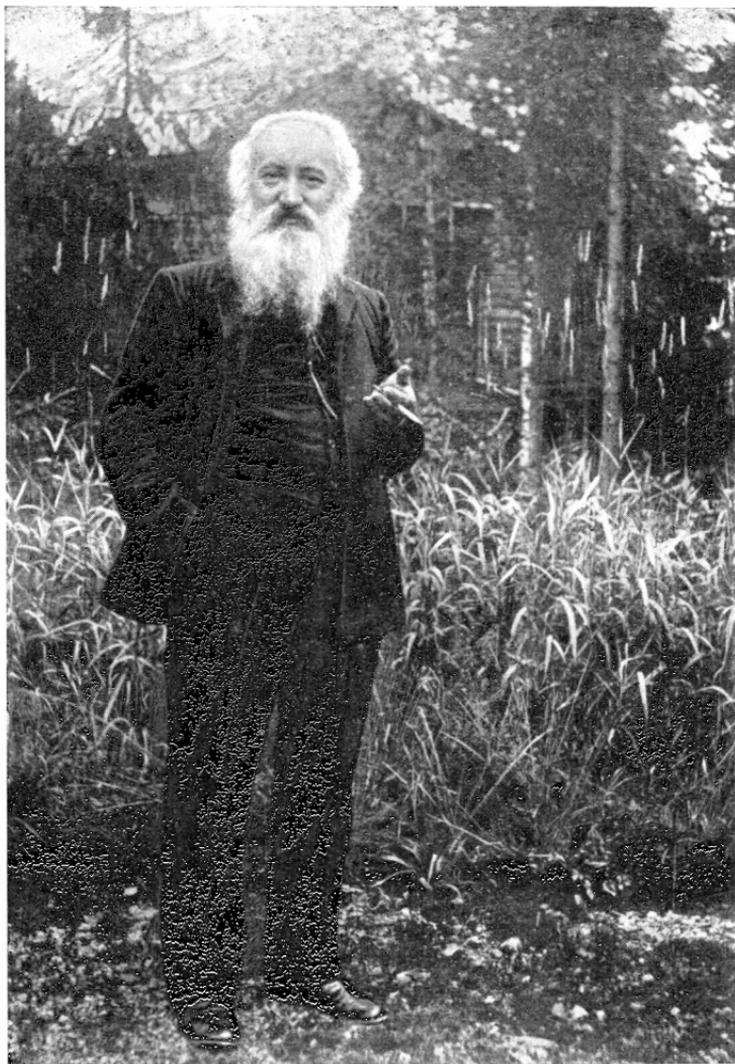
В 1919 г. ученый изъявил согласие баллотироваться в действительные члены Академии наук. Забывая обиды, нанесенные ему старой Академией, он стремился все свои силы и знания отдать на пользу своей обновленной родины.

Преклонный возраст и слабое здоровье не позволили Евграфу Степановичу закончить все, что бы ему хотелось сделать. Но он не желал складывать оружия и вел большую педагогическую и научную работу. Помимо Горного института, Федоров был назначен старшим петрографом Геологического комитета, читал курсы кристаллографии и минералогии в Географическом институте и Институте имени Лесгафта.

Однако тяжелые условия петроградской зимы 1918—1919 гг. дали себя знать — Евграф Степанович заболел воспалением легких. Ослабевший организм не в состоянии был больше бороться, и 21 мая 1919 г. русская наука лишилась своего выдающегося представителя.

Похороны Е. С. Федорова были чрезвычайно торжественны. Несмотря на голодный и холодный 1919 г., за гробом ученого шли сотни людей. На другой день в Горном

²³ И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров. Изд. АН СССР, М.—Л., 1951, стр. 182.



Е. С. Федоров на даче
(1916 г.).

институте было проведено траурное заседание, посвященное памяти гениального кристаллографа.

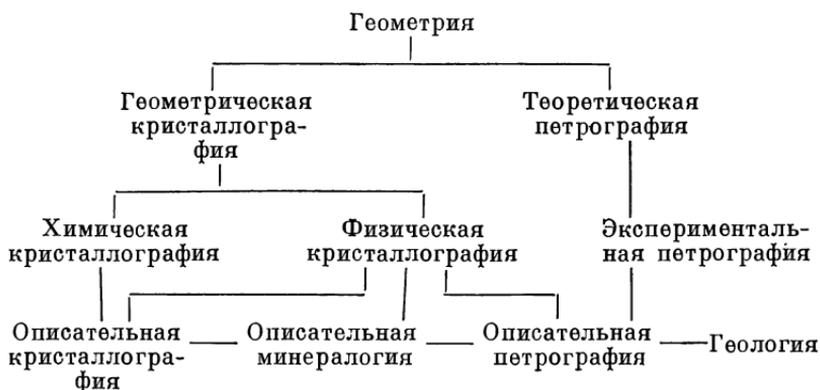
В своих выступлениях академики А. П. Карпинский и А. Е. Ферсман рассказали о замечательных достижениях Евграфа Степановича и о том наследии, которое он нам оставил.

Федоров умер на втором году Великой Октябрьской социалистической революции. Ему не довелось принести строительству социализма всей той пользы, которую он безусловно принес бы; если бы смерть не оборвала его жизнь. И все же уже после 1917 г. им было опубликовано несколько блестящих работ, а вскоре после его смерти вышли набранные еще при жизни Евграфа Степановича огромные по объему и исключительно важные по своему научному и практическому значению сводные таблицы по кристаллохимическому анализу — «Царство кристаллов».

РАБОТЫ ПО КРИСТАЛЛОГРАФИИ, МИНЕРАЛОГИИ, ПЕТРОГРАФИИ И ГЕОЛОГИИ

Для того чтобы дать более полное представление о вкладе, который внес Федоров в различные области науки, исследователи его творчества прибегают к классификации работ ученого. Попытку такой классификации сделал в свое время А. К. Болдырев в статье «Схема научных трудов Е. С. Федорова. Существенные черты его работ по геометрии и геометрической кристаллографии» (1921).¹

Мы здесь приводим эту схему. В ней показана также взаимная связь различных областей наук, которыми занимался Евграф Степанович. Заслуживает особого внимания то, что во главе всей схемы поставлена геометрия.



Здесь же несколько особняком стоят: а) приборы и инструменты, б) учебники, в) философия, г) история

¹ А. К. Болдырев. Схема научных трудов Е. С. Федорова. Существенные черты его работ по геометрии и геометрической кристаллографии. Изв. Географ. инст., 1921, вып. 2, стр. 123—133.

науки. В указателе научных трудов Федорова, который приводится в этой книге (стр. 242—276), содержится 522 названия. Однако список этот далеко не полный: в нем отсутствуют статьи общего характера, печатавшиеся в литературных журналах, газетные публикации и пр. Очевидно, полный учет всего написанного ученым намного расширил бы этот указатель.

А. К. Болдырев распределил труды Федорова на несколько разделов. Воспользовавшись составленной им диаграммой и некоторыми сделанными нами дополнениями, приведем классификацию научного наследия ученого:

	Число трудов		Число трудов
Кристаллография	— 175	Минералогия	— 43
Геометрия	— 130	Универсальный метод	— 62
Петрография и геология	— 64	Статьи общего содержания	— 48

Из этой маленькой таблицы видно, что кристаллографические и геометрические работы преобладают над всеми остальными. Следует добавить, что и универсальный метод, по сути дела, тоже должен быть отнесен к кристаллографии, а также то, что больше половины кристаллографических работ касается геометрической кристаллографии. Вот почему на вопрос: «В какой области больше всего работал Федоров?» — мы должны будем ответить: «В геометрии и кристаллографии прежде всего и лишь затем — в геологии и минералогии».

После ознакомления с учением Федорова о симметрии кристаллов, его «Теодолитным методом», «Кристаллохимическим анализом», «Новой геометрией» необходимо остановиться и на остальных трудах ученого и, в частности, на работах по кристаллографии, минералогии, петрографии и геологии.

К наиболее существенным достижениям в области кристаллографии относится разработанное Федоровым учение о сингониях.

Вопрос о классификации кристаллов по определенным системам долгое время не находил удовлетворительного разрешения. В самом деле, мы уже знаем о существовании 32 видов симметрии, 32 совокупностей элементов симметрии, возможных для конечных кристалличе-

ских многогранников. Среди них явно выделяются отдельные группы, обладающие одной или несколькими одинаковыми осями симметрии. Так, например, во всех кристаллах, относящихся к кубической сингонии, присутствуют четыре тройные оси. Во всех тетрагональных кристаллах имеется одна четверная ось.

В отличие от прежних кристаллографов, пытавшихся как бы наощупь, грубо, эмпирически наметить границы кристаллографических систем, Федоров подошел к этому вопросу со строго математической точки зрения.

В результате такого подхода виды симметрии были подразделены им на две большие группы. В состав первой вошли совокупности элементов симметрии, характеризующиеся наличием одной неповторяющейся оси симметрии. Виды симметрии этой группы соединяются в системы по наименованию неповторяющейся оси. Ко второй группе были отнесены совокупности элементов симметрии, выходящие из правильных многогранников.

Термин «система» употреблялся Федоровым для обозначения геометрических группировок совокупностей элементов симметрии, рассматриваемых как геометрически абстрактные понятия. «По Федорову, термин „система“ в приложении к кристаллам звучал бы, можно сказать, так же искусственно, как, например, слово „очки“, применяемое в отношении наших глаз», — писал выдающийся ученик Евграфа Степановича В. Н. Лодочников в своей книге «Основы кристаллооптики».²

Совершенно по-иному подошел Федоров к установлению родственных групп природных тел — кристаллов. Группы эти он назвал «сингониями» («сингония» — по-гречески сходноугольность). Классифицируя кристаллографические виды симметрии по сингониям, ученый исходил из понятий единичных и симметрично-равных направлений в кристаллах, введенных в науку А. В. Гадолиным. (Единственное неповторяющееся в кристалле направление называется единичным; симметрично-равные направления выводятся друг из друга с помощью элементов симметрии). Число единичных направлений с учетом чисел симметрично-равных и было положено Федоровым

² В. Н. Лодочников. Основы кристаллооптики. Госгеолыздат, 1947. Приложение I.

в основу его сингоний. Вот что по этому поводу писал сам Евграф Степанович:

«В триклинной сингонии все направления единичны». «Моноклинные сингонии определяются тем, что все направления, параллельные одной и той же плоскости, а равно направление, перпендикулярное к этой плоскости, единичны. Все остальные — двойственны».

«Ромбическая сингония определяется тем, что имеется только три взаимноперпендикулярных единичных направления».

«Во всех видах тетрагональной и гексагональной сингоний имеется всего одно единичное направление — ось симметрии высшего, чем два наименования (главная ось). В видах симметрии тетрагональной сингонии имеются перпендикулярные к главной оси частные равные направления в числе двух, а в видах симметрии гексагональной сингонии имеются аналогичные направления в числе трех».

«Если мы примем в рассмотрение не только особые направления в плоскости, перпендикулярной к главной оси, но и направления наклонные, то сингония гексагональная естественно разделится на две более мелкие группы, называемые видами гипосингонии. Если имеются в данном виде симметрии особые, но наклонные направления в числе трех, то вид симметрии будет отнесен к гипосингонии тригональной, а если наименьшее число наклонных равных направлений есть шесть, то вид симметрии относится к гипосингонии гексагональной».³

«Кубическая сингония характеризуется полным отсутствием единичных направлений».⁴

Эти положения Федорова легли в основу современной классификации кристаллов и сохранили до сих пор все свое значение.

Всемирное признание получила также федоровская номенклатура видов симметрии. Евграф Степанович предложил называть виды симметрии по тем кристаллографическим формам, грани которых ориентированы косо

³ В наиболее распространенной современной классификации тригональная гипосингония отделяется от гексагональной и рассматривается как самостоятельная сингония.

⁴ Е. С. Федоров. Учение о сингониях. Abhandl. d. Bayer. Akad. d. Wiss., Mathem.-phys. Cl., 1906, т. XXIII, ч. 1, стр. 1—88.

(т. е. находятся в общем положении) относительно всех элементов симметрии данного вида симметрии. Такие формы носят название общих форм. В качестве иллюстрации можно привести следующий простой пример.

Обратимся к виду симметрии, характеризующемуся наличием одной единственной четверной оси симметрии. Рассмотрим грань общего положения, т. е. грань, ориентированную косо относительно данной оси. Таких граней должно быть обязательно четыре. Продолжив их до взаимного пересечения, мы получим четырехгранную пирамиду, называемую в кристаллографии «тетрагональной». Подобный вид симметрии, обладающий одной единственной четверной осью, согласно номенклатуре Федорова, носит название «тетрагонально-пирамидального вида симметрии».

Федоровская номенклатура была полностью принята П. Гротом, который энергично пропагандировал ее в своих руководствах и в издававшемся им кристаллографическом журнале. В результате номенклатура нашла повсеместное применение под именем «грововско-федоровской».

К разделу геометрической кристаллографии относятся также обширные циклы статей Федорова «Теория кристаллической структуры» (1894—1905) и «Дополнения к зональной кристаллографии» (1900—1901).

В первом из этих циклов развивается теория строения кристаллов. Во втором Федоров, исходя из понятия зон или поясов, т. е. совокупностей граней, пересекающихся в параллельных ребрах, устанавливает важные закономерности в отношении порядка развития граней на кристаллах.

В этой связи заслуживает особого упоминания ряд статей ученого, посвященных вычислениям кристаллов на основе гониометрических данных, а также публикации о методах проектирования кристаллов.

К разделу физической кристаллографии относятся труды Федорова, в которых излагается универсальный метод оптических исследований. Кроме своего знаменитого столика, Федоров сконструировал целый ряд оптических приборов, в частности, им был предложен слюдяной компенсатор, стеклянные сегменты и др. Евграф Степанович разработал способ измерения показателей преломления в зернышках микроскопических препара-

тов, точную методику определения коэффициентов термического расширения кристалла, а также описал и теоретически объяснил открытые им особые оптические явления, получившие названия псевдохроизма, псевдодихроизма, псевдоабсорбции и т. д.

В области химической кристаллографии, помимо работ по кристаллохимическому анализу, Федорову принадлежит большое количество статей, в которых рассматриваются проблемы роста и растворения кристаллов, полиморфизма, изоморфизма и т. п.⁵ Особо следует упомянуть об оригинальных опытах и высказываниях ученого по вопросам кристаллогенезиса и несовершенства кристаллов.

Проблема реального кристалла со всеми его несовершенствами и отклонениями от идеальной схемы имеет сейчас огромное значение. При практическом использовании кристаллических тел необходимо учитывать не правильности в их внутреннем строении, иногда отражающиеся и на внешней форме. Е. С. Федоров в своем «Курсе кристаллографии», касаясь вопроса об усложнениях в кристаллообразовании, писал следующее:

«Пока мы имели дело с совершенным кристаллом, мы находились в области одной из самых точных наук математического характера, так называемой теоретической кристаллографии. Обращаясь к ознакомлению с несовершенствами в кристаллообразовании, мы выходим из области этой науки и входим в область науки более или менее эмпирического характера. Нет сомнения, что со временем и из этой области будут выделены отделы, изучающие такие явления, которые подводятся под строгие законы математического характера, и тогда отделы эти перейдут в область теоретической кристаллографии».⁶

Создание науки о реальном несовершенном кристалле — задача сегодняшнего дня.

⁵ При полиморфизме одинаковые по составу вещества образуют разные структуры. Таковы, например, столь различные по физическим свойствам кубический алмаз и гексагональный графит, обладающие одним и тем же химическим составом (углерод). При изоморфизме различные, хотя и сходные по химическому составу вещества кристаллизуются в близких в геометрическом отношении структурах и дают смешанные кристаллы.

⁶ Е. С. Федоров. Курс кристаллографии. СПб., 1901, стр. 280.

КУРСЪ
КРИСТАЛЛОГРАФІИ

Е. С. Федорова,

горнаго инженера, профессора Московскаго Сельско-Хозяйственнаго Института,
члена Королевской Баварской Академіи Наукъ, почетнаго члена Императорскаго Московскаго Общества Любителей Естествознанія, почетнаго доктора Императорскаго Московскаго Университета.

3-е заново переработанное изданіе.

(съ 994 фигурами въ текстѣ и тремя таблицами).

Въ книгу приложены три стереографическія сѣтки.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Изданіе К. Л. РИККЕРА.
Невскій проспектъ, 24,
1901.

Титульный лист «Курса кристаллографии» Е. С. Федорова, изданного в 1901 г.

Евграф Степанович, будучи создателем математической науки об идеальных кристаллических структурах, вместе с тем усиленно работал и экспериментально.

Остановимся на одном из проведенных им замечательных опытов. Его легко может повторить каждый, кто захочет. Берутся два кубических спайных осколка каменной соли: первый — с хорошими плоскостями куба, на втором пришлифовывается косая плоскость, образующая неправильную треугольную площадку. На плоскости куба первого осколка помещается капля насыщенного раствора,⁷ которая прикрывается пришлифованной треугольной площадкой второго осколка. Через незначительный промежуток времени на пришлифованной площадке можно обнаружить белый налет выделившейся соли, тогда как на нижней плоскости куба улавливается отчетливый отпечаток треугольной площадки в виде очень тонкого углубления.

Опыт этот показывает, что насыщенный раствор относительно треугольной площадки оказался сильно пересыщенным, тогда как относительно нижней плоскости тот же раствор являлся некоторое время даже ненасыщенным.

«Следовательно, — говорит Евграф Степанович, — не по всяким плоскостям (иначе сказать: не во всех направлениях) растворимость кристаллического вещества одинакова, и во всяком случае наибольшее значение она получает для важнейших (в нашем случае кубических) граней».⁸

Особенно интересовали ученого отклонения граней реальных кристаллов от идеальных плоскостей. На та-

⁷ В определенном объеме растворителя при определенной температуре и давлении твердое вещество может растворяться лишь до известного предела. Раствор, в котором при данных условиях происходит растворение новых добавочных порций твердого вещества, называется ненасыщенным. Раствор, в котором при данных условиях прибавление новых порций твердого вещества не сопровождается их дальнейшим растворением, называется насыщенным. В связи с тем, что растворимость веществ, как правило, возрастает с повышением температуры, можно получить пересыщенный раствор, содержащий по сравнению с насыщенным раствором избыток растворенного вещества. С течением времени избыток вещества из такого раствора обычно выпадает в виде кристаллического осадка.

⁸ Е. С. Федоров. Процесс кристаллизации. Природа, 1915, № 12, стб. 1472.

ких гранях нередко наблюдаются «очень пологие плоские углубления и возвышения». Плоскости эти называются «вицинальными» (vicinus — соседний). В литературе существовало два взгляда на их происхождение. Одни ученые (Ж. Шустер и др.) полагали, что вицинальные плоскости являются самостоятельными гранями, подчиняющимися основным законам кристаллографии. «Другие же (характерно, что преимущественно русские исследователи, начиная с Ерофеева и Карножицкого) приводили доказательства того, что это просто уклонения главной грани от среднего положения на небольшие углы».⁹

Для решения вопроса о природе вицинальных плоскостей Евграф Степанович вырезал из кристалла кварцов выпуклую полусферу. Такая же, но только вогнутая полусфера была выточена внутри другого куска этого же кристалла. Выпуклая полусфера вплотную вставлялась в специально сделанное углубление. В промежуток между сферическими поверхностями впускалась капля насыщенного раствора того же вещества, из которого были приготовлены эти полусферы. При этом в одних местах полушарий из капли отлагалось кристаллическое вещество, тогда как в других происходило растворение его. Известно, что «преимущественное растворение должно было происходить в тех точках полушарий, в которых касательные плоскости соответствуют важнейшим граням кристаллов этого вещества».¹⁰ В результате на выпуклой полусфере вокруг этих точек образовались большие плоские площадки, в то время как на вогнутой поверхности появилось множество крошечных граней. Особенно густо такие грани концентрировались вблизи уже упоминавшихся нами точек. По мере удаления от них число мелких граней уменьшалось. При этом их отклонение от центральной точки соответствовало теоретическим отклонениям от среднего, по теории вероятности, для отклонений случайного характера.

Из всего этого Федоров делал вывод о том, что «вопрос можно считать окончательно решенным в пользу случайных отклонений. Вместе с тем раз навсегда констатируется существование в реальных кристаллах нарушения той кристаллической однородности, которая теорией при-

⁹ Там же, стб. 1474.

¹⁰ Там же.

писывается идеальным кристаллам».¹¹ Затем ученый обращает внимание на результаты известных опытов Майерса, показавших, что рост кристаллов идет не непрерывно, а скачками.

Все сказанное привело Федорова к следующему заключению: «Во-первых, невозможно представлять себе процесс кристаллизации в виде более или менее непрерывного выскакивания из раствора отдельных кристаллических частичек и укладывания их к существующему уже кристаллическому строению в строго параллельном положении.

«Во-вторых, можно считать доказанным, что от времени до времени начавшаяся кристаллизация быстро созидает целые пластинки из строго параллельно расположенных частичек, пластинки, сразу же лежащие на всю грань или значительные части ее площади, и что эти пластинки, конечно, состоят не из одного, а из очень многих слоев частичек. . . Но образовавшийся слой может лечь на основание не с полной строгостью параллельности, да и сам может не иметь одинаковой толщины».¹² В этом, по мнению Евграфа Степановича, и коренится причина образования вицинальных плоскостей.

В настоящее время, когда применение однородных кристаллов кварца, корунда, флюорита, кальцита и пр. в промышленности приобрело важное значение, вопрос о несовершенствах реальных кристаллов играет особенно большую роль. В связи с этим особый интерес представляют и выводы, сделанные Федоровым, выводы, которые и сейчас живо интересуют кристаллографов.

Под руководством Евграфа Степановича его учеником Д. Н. Артемьевым был разработан особый метод кристаллизации шаров, также сохранивший свое значение до наших дней.

Исследование граней, выросших в пересыщенном растворе на шаре, вырезанном из кристалла, дает очень любопытный и важный материал для изучения связи между внешней формой и внутренним строением кристаллического вещества.

Свои важнейшие выводы в области кристаллографии Евграф Степанович неоднократно обобщал в известных «Курсах кристаллографии». Четыре издания этих «Кур-

¹¹ Там же, стб. 1475.

¹² Там же, стб. 1477.

сов» (1891, 1897, 1901, 1910) ярко отражают непрерывное развитие его творческой мысли. По глубине и оригинальности книги эти являются столь же характерными для Федорова, как «Основы химии» для Менделеева. От других руководств по кристаллографии того времени федоровские «Курсы» прежде всего отличались строго математическим изложением. Евграф Степанович, по выражению А. К. Болдырева, «поставил в них кристаллографию прочно, неизменно и невозвратно на точный математический геометрический базис». ¹³ Не одно поколение кристаллографов и минералогов изучало науку о кристаллах по этим классическим руководствам.

Переходя к трудам Е. С. Федорова по петрографии и минералогии, прежде всего отметим, что сам ученый никогда не проводил резкой границы между этими науками, тесно связывая их также и с кристаллографией. Эта взаимосвязь наглядно обрисована им в следующем отрывке:

«Ходом истории науки дело сложилось так, что цикл минералого-геологических наук представляет собой дугу, с одной стороны упирающуюся в центр земного шара, с другой уходящую в беспредельное звездное пространство. Если эта дуга утоняется с ее обоих концов, то, наоборот, в своей средней части... она утолщается до столь гигантских размеров, что захватывает собой все физико-математические и естественные науки». ¹⁴

Работы Федорова по минералогии и петрографии, отличаясь новыми, точными приемами исследования, касаются самых различных вопросов. ¹⁵ Часть минералогических трудов тесно связана с кристаллографическими исследованиями ученого. К ним, в частности, относится монография «Критический пересмотр форм кристаллов минерального царства» (1908). Большое значение получили уже упоминавшиеся выше федоровские диаграммы, демонстрирующие зависимость между составом и оптическими свойствами полевых шпатов. Такие диаграммы

¹³ А. К. Болдырев. Схема научных работ Е. С. Федорова, стр. 133.

¹⁴ Е. С. Федоров. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, стр. 1.

¹⁵ Дальнейшая характеристика минералогических работ Е. С. Федорова взята в основном из книги Д. П. Григорьева и И. И. Шафрановского «Выдающиеся русские минералоги» (1949).

позволяют очень точно определить эти минералы на федоровском столике. Чтобы подчеркнуть роль таких диаграмм в науке, напомним, что и классификация изверженных горных пород в значительной мере производится на основании состава присутствующих в них полевых шпатов. Диаграммы эти, таким образом, имеют выдающееся значение не только для минералогии, но и для петрографии.

Федоров изучил и описал также большое количество природных и искусственных минералов. Им было открыто несколько новых минеральных видов, или разновидностей. Сюда относится эрнит — разновидность бронзита (из группы пироксенов) и виолаит — разновидность пироксена, найденная Евграфом Степановичем в им же открытой горной породе — кедабеките. (Название «виолаит» было дано по имени итальянского минералога Виола, открывшего незадолго до этого новую разновидность пироксена, которую он назвал в честь русского ученого «федоровитом»).

Остальные минералогические работы Федорова отражают его искания в области новой геометрии. Им, например, был дан способ графического изображения сложнейшего химического состава таких минералов, как слюды, хлориты и турмалины.

Многим обязана Федорову и наука о горных породах — петрография.¹⁶ Достаточно напомнить хотя бы то, что Евграфом Степановичем был создан оригинальный полный курс петрографии, который он читал в Горном институте до последних дней своей жизни.

Разработкой петрографических вопросов Федоров начал заниматься с первых шагов своей научной деятельности. Уже в то время он подчеркивал необходимость одновременного изучения горных пород и в петрографическом, и в геологическом направлениях. На примере горных пород Урала Евграф Степанович подробно продемонстрировал процесс динамометаморфических изменений.¹⁷ Им были тщательно исследованы авгито-гранато-

¹⁶ Характеристика петрографических работ Е. С. Федорова почерпнута нами в основном из статей проф. С. П. Соловьева «Роль акад. Е. С. Федорова в развитии петрографии» (1949) и «Петрографическое наследие Е. С. Федорова» (1955).

¹⁷ Динамометаморфизм — изменения в горных породах, вызванные механическими горообразующими процессами.

вые породы со всеми их разновидностями. Следует, однако, отметить, что представление о магматической природе этих пород оказалось ошибочным. Более поздние исследования показали их контактово-метаморфическое происхождение. В результате изучения петрографического материала, собранного им на побережье Белого моря, Федоров пришел к выводу о необходимости выделить особую группу горных пород, в которых минералы кристаллизовались в виде концентрических слоев. Такие породы он назвал «друзитами».

В статье «О новой группе изверженных пород» подчеркивается последовательность выделения минеральных составных частей при их выпадении из магмы и устанавливается следующий порядок выделения минералов: 1) оливин, 2) энстатит, 3) гиперстен, 4) авгит, 5) гранат (или зеленая роговая обманка), 6) биотит, 7) плагиоклаз.

«Если бы мы приняли эту последовательность за общий закон, — писал ученый, — то пришлось бы сказать, что в отдельных породах некоторые составные части не появляются, или же происходит смешение минералов разных поколений. . . Если отвлечься от этих частных, то мы действительно приходим к одному общему закону последовательности выделения минеральных составных частей».¹⁸

Идея последовательного выделения минералов из магмы и их отсортировки по удельному весу развивалась Федоровым и в других его работах. «Если минералы первого выделения, — писал он в работе «О петрографической номенклатуре», — резко отличаются по удельному весу от остальной магмы, то они отсортировываются по этому свойству и образуют местные, более или менее густые скопления и даже сплошные толщи».¹⁹

Обобщая все вышесказанное, проф. С. П. Соловьев подчеркивает, что Евграф Степанович «был одним из первых исследователей, разрабатывавших теорию дифференциации, которую в настоящее время принято называть гравитационно-кристаллизационной дифференциа-

¹⁸ Е. С. Федоров. О новой группе изверженных горных пород. Изв. Моск. с.-х. инст., 1896, кн. 1, стр. 168.

¹⁹ Е. С. Федоров. О петрографической номенклатуре. Изв. Моск. с.-х. инст., 1898, кн. 3, стр. 390.

цией». ²⁰ «Некоторые геологи, — продолжает С. П. Соловьев, — считают, что эта теория является целиком импортированной из-за границы, но приведенные данные отчетливо указывают ошибочность таких взглядов». ²¹

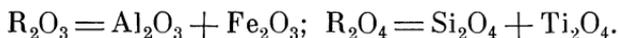
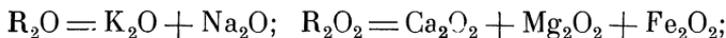
Изучая химизм горных пород, Федоров еще в 1889 г. пришел к следующему важному выводу: «Минералы некоторых групп и прежде всего группы полевых шпатов, пироксена и амфибола обладают способностью приспособляться к постепенно изменяющемуся составу магмы, параллельно сами изменяясь в своем составе». ²² В этом, по мнению ученого, и кроется причина особой распространенности данных минералов в составе горных пород.

Сделав такой исключительно важный вывод, Федоров и в этом вопросе установил приоритет русской науки, опередившей в своем развитии достижения зарубежных петрографов.

Немало внимания уделил Евграф Степанович графическому изображению химического состава горных пород. Им, в частности, были даже предложены специальные «символы химического состава», представляющие отношение молекулярных количеств:



где



Приводя сумму к 100, т. е. выражая ее в процентах, мы получим характеристику химического состава в виде символа ($a : b : c : d$), где

$$a : b : c : d = R_2O : R_2O_2 : R_2O_3 : R_2O_4.$$

При этом

$$a + b + c + d = 100.$$

²⁰ Гравитационно-кристаллизационной дифференциацией называются такие процессы, в результате которых огненно-жидкая магма, кристаллизуясь, распадается на различные породы.

²¹ С. П. Соловьев. Петрографическое наследство Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 151.

²² Е. С. Федоров. Об изучении химизма минералов и горных пород. Зап. Минералог. общ., 1899, т. XXXVII, стр. 269.

Ученый разработал также геометрический способ изображения этих составов с помощью так называемых «барицентрических координат».²³ Федоров предложил пользоваться для этого правильным тетраэдром, располагая в вершинах его вместо навесок величины (a , b , c , d), взятые из символа химического состава. Достоинства такого метода изображения подробно описаны академиком А. Н. Заварицким.²⁴

В работах Федорова содержатся важные высказывания, касающиеся петрографической номенклатуры и классификации горных пород. Евграф Степанович считал, что классификация горных пород должна базироваться на минералогических и структурных признаках. «В основание классификации горных пород, — говорил он, — не только потому нельзя класть их элементарного химического состава, что состав этот весьма изменчив, по крайней мере в некоторых случаях, что он не всегда неразрывно связан с минералогическим составом, но и еще и потому, что всякие дальнейшие так называемые вторичные изменения пород слишком резко отражаются на этом составе, тогда как минералогическая и структурная характеристика породы сравнительно легко осуществляется даже и для весьма изменчивых пород».²⁵

Достигнутые им результаты в исследовании горных пород Федоров популяризировал в своем учебнике «Основания петрографии» (1897), пользовавшемся в свое время широкой известностью. В нем ученый изложил приемы оптического исследования кристаллических веществ с помощью теодолитного столика, описал главнейшие порообразующие минералы и дал характеристику трех классов горных пород: изверженных, осадочных и метаморфических.

Особенно выдающаяся роль принадлежит Евграфу Степановичу, как мы уже знаем, в развитии методов петрографических исследований. Своими работами в этой

²³ В барицентрической системе координат положение точки определяется как центр тяжести весов, приложенных в вершинах треугольника в случае трех компонентов, или тетраэдра — в случае четырех компонентов.

²⁴ А. Н. Заварицкий. Введение в петрохимию. Изд. АН СССР, М., 1944.

²⁵ Е. С. Федоров. О новой группе изверженных пород, стр. 168.

области Федоров внес поистине неоценимый вклад в науку. Вот почему справедливо звучат слова С. П. Соловьева: «Имя гениального ученого Е. С. Федорова внесено золотыми буквами на страницы истории петрографии».²⁶

К петрографическим работам ученого примыкают отчасти его труды по описательной и физической геологии, рудным месторождениям и другим геологическим вопросам. Выше уже упоминались крупные исследования Федорова, посвященные Северному Уралу, Богословскому округу, побережью Белого моря и Кедабеку. Ему мы обязаны открытием ряда новых месторождений полезных ископаемых, петрографическим и геологическим анализам некоторых районов Урала, Кавказа и Казахстана. Евграф Степанович был также одним из первых, кто указал на огромное значение апатитового сырья, залегающего в недрах нашего Севера.²⁷ Мы знаем теперь, сколь прозорливы были эти предсказания.

Большое значение имело установление Федоровым в Кедабекском районе рудоносных пород, богатых кварцем, которые он назвал «вторичными кварцитами». В результате позднейших исследований советских геологов были обнаружены такие же породы во многих других местах. Эти породы особенно интересны тем, что с ними связаны месторождения ряда полезных ископаемых.

Большой интерес представляют и уже упоминавшиеся выше собственно геологические работы Федорова, которыми ученый внес немаловажный вклад в изучение геологии нашей Родины. Эти исследования, по мнению В. В. Никитина, «отличаются оригинальностью приемов работы, детальностью и глубиной микроскопической обработки собранного материала, смелостью и оригинальностью выводов. Правда, в этой области, малодоступной приемам совершенно точного мышления, смелость выводов не раз приводила Евграфа Степановича к заключениям, которые впоследствии оказывались ошибочными. Но смелость постановки вопроса делала и в этом случае свое дело, вызывая ускорение в решении запутанного вопроса.

²⁶ С. П. Соловьев. Роль акад. Е. С. Федорова в развитии петрографии. Зап. Всесоюзн. Минералог. общ., LXXVIII, № 4, 1949, стр. 240.

²⁷ Е. С. Федоров. Белое море как источник материала для сельскохозяйственной культуры. СПб., 1909.

«Следует еще отметить, — писал Никитин, — что геологические работы Евграфа Степановича отличаются, в противоположность работам по геометрии и кристаллографии, сравнительной доступностью. Большинство из них читается легко, а некоторые страницы, начиная с отчета о геологических исследованиях в Северном Урале в 1887—1889 гг., написаны живо и увлекательно».²⁸

Нельзя не упомянуть также и философских сочинений ученого. Один из самых первых его научных трудов — философский трактат «Перфекционизм» — увидел свет в исправленном и дополненном виде лишь в 1906 г.

В нем Федоров выступает как убежденный материалист и диалектик. Исходя из диалектического принципа, что «естественные условия суть именно условия вечных изменений», он нападает на философов, проповедовавших теорию устойчивости и равновесия в природе. Сущность эволюции не в стремлении к наивысшей стройности, устойчивости и равновесию организмов, а в их «жизненной подвижности». Разоблачая мировоззрение Спенсера и других сторонников «равновесия» в природе, Федоров писал: «Смысл всех подобных мировоззрений на почве естественно-исторической эволюции сводится к признанию наибольшей прочности. . . Но почему-то творцы этих мировоззрений систематически просматривают тот факт, что это достигается в момент смерти. Пока же жизнь кипит ключом, развиваются формы неустойчивые (подвижные). . . По этой причине введение в естественную философию понятия прочного, устойчивого как высшей задачи жизни я считаю глубоко ошибочным. — Жизнь никогда ничего не достигает окончательно, а вечно стремится достигнуть. Вот истинная философия природы».²⁹

Позднее, в ряде печатных выступлений, Е. С. Федоров защищал передовую науку от позитивизма — идеалистического философского течения, пытавшегося принизить значение теоретического мышления и насадить в естествознании, с одной стороны, голый эмпиризм, а с другой — скептицизм и агностицизм. Позитивизм, по

²⁸ В. В. Никитин. Евграф Степанович Федоров. Изв. Геол. ком., т. 38, № 4—7, 1919, стр. 439.

²⁹ Н. М. Соколов. О мировоззрении Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография», вып. 5, Изд. Ленингр. горн. инст., 1956, стр. 18.

словам ученого, «низводит значение ума на простую форму для более удобного укладывания собираемого опытного материала».³⁰

Разоблачая попытки позитивистов и махистов отбросить атомистическую теорию, Е. С. Федоров спрашивает: «Что стало бы с современной наукой, если бы мы отбросили все это как метафизические бредни. . . , если бы вместо ясной руководящей идеи, давшей как раз особенно в последние годы так много не только ценных, но, можно сказать, ошеломляющих открытий, современные ученые почти наобум изощрялись бы в несистематизированных и бессвязных наблюдениях и опытах?».³¹ Здесь, конечно, уместно напомнить, что только твердая убежденность в реальном существовании атомов позволила нашему ученому вывести 230 геометрических законов расположения элементарных частиц в кристаллах.

Незадолго до смерти Федоров начал писать большую популярную статью «Единство человечества и единство науки». В ней он призывал на основе научных данных широко пользоваться силами, проявляющимися в природе. Мысль о благе Родины, о развитии ее производительных сил пронизывает красной нитью это последнее неоконченное произведение Евграфа Степановича.

Великий ученый — кристаллограф и геометр, минералог и петрограф, геолог и химик, инженер и педагог — Федоров внес богатый и многогранный вклад в науку. Не все его научное наследие уже достаточно хорошо и полно изучено, оно еще ждет внимательного и настойчивого исследователя. В трудах замечательного русского ученого «рассеяно, — говорит А. К. Болдырев, — множество оригинальных идей, и можно думать, что многие из них послужат как бы почками, из которых расцветут целые новые отрасли тех дисциплин, в которых работал Евграф Степанович».³²

³⁰ Е. С. Федоров. Из итогов тридцатипятилетия. М., 1904, стр. 9.

³¹ Там же.

³² А. К. Болдырев. Схема научных трудов Е. С. Федорова, стр. 123.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ТВОРЧЕСТВА

В последние годы своей жизни Федоров охотно выступал со статьями, трактовавшими общие научные и общественные вопросы. Некоторые из этих статей были им опубликованы уже после революции в издающемся и ныне научно-популярном журнале «Природа». Работы эти могут служить, пожалуй, наиболее яркой характеристикой взглядов ученого по вопросам науки и ее роли в современной жизни. По мнению Евграфа Степановича, отличительная черта нынешнего столетия состоит «в каком-то особенном напряжении расцвета науки, в появлении глубоких новых отраслей знания, в исчезновении перегородок, разделяющих разные отрасли знания и жизни».¹

В обзоре новейших научных достижений Федоров пишет: «Недавно, всего несколько лет тому назад, науки резко разграничивались друг от друга, даже ближайшие, как физика и химия. Какой мудрец укажет на границу между ними теперь?».²

Далее Евграф Степанович затрагивает вопрос об искусственности разграничения наук: «Прежде всего является вопрос, существуют ли вообще настоящие границы между какими-либо науками и не составляют ли все науки, взятые в целом, нечто объединенное и естественно неразделимое, а то, что выставляется как границы отдельной науки, не есть ли лишь нечто искусственное, натянутое, подогнанное соответственно уровню знаний в каж-

¹ Е. С. Федоров. Природа и человек. Природа, 1917, № 4, стб. 423.

² Там же.

две данное время?». ³ Наиболее плодотворные результаты в науке, по мнению Федорова, могут быть достигнуты теми учеными, которые разбивают искусственные перегородки, установленные между отдельными дисциплинами, и работают в смежных областях науки.

Именно так поступал и сам Евграф Степанович. В его трудах гармонично сочетаются достижения самых различных областей науки. Глубочайшие математические выводы являются основой федоровской теории строения и симметрии кристаллов. Принцип устройства теодолита, прибора, употребляемого геодезистами и топографами, был использован Федоровым при создании теодолитного гониометра и универсального столика, служащих кристаллографам, минералагам и петрографам. Геометрическая кристаллография нашла применение в химии и кристаллохимическом анализе. Наконец, разработка новой геометрии привела Евграфа Степановича к разрешению практических задач кристаллографии, минералогии, петрографии, горного дела, физической химии и т. д.

Первая особенность творчества Е. С. Федорова состоит в том, что он, как писал академик А. Е. Ферсман, «умел сочетать методы отвлеченного, математического анализа с эмпирическими законами старой кристаллографии, приемы и методы кристаллографических исследований с описательными данными минералогии; он вносил принципы геометрии в область петрографии, химию сочетал с кристаллографией в новой созданной им области кристаллохимического анализа и даже в область такой прикладной отрасли знания, как маркшейдерское искусство, вносил основания новой геометрии.

«Благодаря ему химик при помощи метода кристаллографии может сейчас по одному ничтожному кристаллику определить химическую природу вещества: при содействии методов геодезии и астрономии кристаллограф заменяет грани и углы кристаллов координатами точек, как звезд, рассеянных на звездном небе; при помощи новой геометрии петрограф на плоскости изображает состав горных пород, намечая новые основания для их классификации. Методы геометрии четырех измерений в его уме начинают проливать свет на соотношения солей в сложных физико-химических системах озер, а химия

³ Там же, стб. 425.

с минералогией сливается в своеобразных схемах внутреннего состава молекул». ⁴

Вторую особенность творчества Федорова А. Е. Ферсман видел в умении ученого делать обобщения и находить упрощенные решения при анализе явлений природы.

«Федоров талантливо умел упрощать уравнения природы и в самом простом искать разрешение сложного, — писал Ферсман. — Он часто подчеркивал любовь природы к простейшим, к малым и целым числам в сочетании атомов и к тем же простым и малым числам при построении кристаллов. „Самое простое — обычно есть самое правильное“, — говорил он мне, критикуя одну из моих работ и подыскивая более простое объяснение одной из намечавшихся законностей. ⁵

«И он был глубоко прав, и как завет одного из крупнейших мыслителей России последних лет мы должны помнить эту необходимость упрощения и искания простейшего разрешения каждой ставящейся перед нами проблемы. Этого упрощения он добивался не только в анализе природных процессов, но и в методике самого исследования, в создании тех приемов, при которых до минимума сокращался бы труд наблюдателя и благодаря которым эксперимент мог бы ответить на любой вопрос, ставящийся теорией:

«Многие из нас знают, как сложно и скучно было измерение кристаллов на однокружных гониометрах, сколько возни было с переклеиванием кристаллов для установки на приборе; весь этот длиннейший труд заменен был тем простым и изящным измерением, которое в час может пометить свыше 20 точек и которое достижимо

⁴ А. Е. Ферсман. Памяти Евграфа Степановича Федорова. Природа, 1919, № 4, стб. 6.

⁵ Здесь А. Е. Ферсман, по-видимому, вспоминает свое выступление в Минералогическом обществе с докладом о закономерных сростаниях кварца и полевого шпата, образующих так называемую «письменную структуру». В. И. Крыжановский так описывает это выступление: «Присутствовавший на докладе маститый профессор Горного института Е. С. Федоров с присущей ему страстностью, которую он всегда проявлял в научных вопросах, подверг Александра Евгеньевича самому строгому экзамену по всем деталям доклада, но А. Е. блестяще выдержал это испытание и тут же был приглашен Е. С. Федоровым повторить доклад в Горном институте в федоровском кружке кристаллографов» (В. И. Крыжановский. Поездки А. Е. Ферсмана на уральские пегматиты. Бюлл. Моск. общ. испыт. прир., отд. геолог., т. 21, № 1, 1946, стр. 113).

только с применением теодолитных методов. Еще больше изящества внес Федоров в оптические исследования под микроскопом; до него надо было готовить серию шлифов, каждый разрез сопоставлять с другими разрезами того же минерала и из сопоставления выявлять природу минерала — все это отпало перед „федоровским столиком“, позволившим каждое зернышко поворачивать в поле зрения и ставить его в почти любое положение по отношению к оси микроскопа.

«Теодолитный метод в кристаллографии и петрографии, несомненно, сыграет роль в истории этих наук не меньшую, чем самые глубокие обобщения и завоевания теоретической мысли».⁶

Третья особенность творчества Федорова заключается в его стремлении придать математическую форму всем своим научным выводам. «Венец сознательной человеческой деятельности человеческого разума — решение стоящих перед ним вопросов путем математического анализа», — любил повторять он. Недаром в качестве эпиграфа к своему труду «Теодолитный метод в минералогии и петрографии» Евграф Степанович предпослал слова Канта: «В каждой особой области естествознания содержится столько действительной науки, сколько в ней может содержаться математики».

«В чем сущность, в чем главный нерв теоретико-кристаллографических работ Федорова?» — спрашивал его ближайший ученик и последователь, профессор А. К. Болдырев. И тут же отвечал: «Их главный нерв, их главное значение в том, что Федоров поставил кристаллографию прочно, неизменно и безвозвратно на точный математический, геометрический базис».⁷

Замечательный русский ученый и к естественно-историческим наукам — к геологии, минералогии, петрографии — всегда подходил аналитически, т. е. стремился понять природные образования и явления с помощью общих математических и физико-химических законов.

Однако нельзя безоговорочно согласиться с А. Е. Ферсманом, когда он говорит, что «Федоров не любит собирать материал, накапливать его для будущего, его тянет

⁶ А. Е. Ферсман. Памяти Е. С. Федорова, стб. 239—240.

⁷ А. К. Болдырев. Схема научных трудов Е. С. Федорова. Существенные черты его работ по геометрии и геометрической кристаллографии. Изв. Географ. инст., 1921, вып. 2, стр. 133.

не к точному наблюдению, а к анализу и к математической абстракции».⁸

Ведь даже для того, чтобы написать одну свою работу — «Царство кристаллов» — Евграф Степанович употребил массу времени и сил для сбора, а затем обработки колоссального материала по кристаллографии, лежащего в основе этого выдающегося труда. Усердно собирал Федоров и минералогические и петрографические материалы, которые легли в основу его теодолитного метода.

Федорова не только «тянуло к анализу и математической абстракции». Наоборот, мы знаем, что даже такие, казалось бы, абстрактные понятия, как пространства четырех, пяти и т. д. измерений, были им использованы в целях изображения многокомпонентных составов. В этом существеннейшее отличие работ русского ученого по новой геометрии от того, что делали его современники, зарубежные геометры, тяготевшие к голым абстракциям и беспредметным схемам, оторванным от жизни и практических запросов. Особенность творчества нашего выдающегося соотечественника и заключалась в его постоянной тяге к тому, чтобы связать науку с жизнью, к тому, чтобы использовать достигнутые результаты в целях, как говорил он сам, «направления действующих в природе сил на пользу людей».

Свою статью о Е. С. Федорове акад. А. Е. Ферсман закончил следующими словами: «Мы помним его маленькую фигурку с седой окладистой бородой и с пронизательными, глубокими, спокойными глазами, мы помним его неровную, вдумчивую, увлекательную речь, мы помним всю судьбу этого русского ученого со всей его гениальностью и со всем трагизмом человека, преследующего непризнанные, свои собственные пути».⁹

Ныне по пути Федорова развиваются во всем мире науки о кристаллах, минералах и горных породах.

⁸ А. Е. Ферсман. Памяти Е. С. Федорова, стб. 238.

⁹ Там же, стб. 237.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ ТРУДОВ Е. С. ФЕДОРОВА ¹

1881

1. О попытке подвести атомные веса под один закон. — Журн. Русск. физ.-хим. общ., 1881, т. XIII, вып. 4, стр. 244—245.

1882

2. Теория двойников. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1882, ч. 17, стр. 381.

1883

3. Местонахождение крупных кристаллов магнитного железа на горе Благодати. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1883, ч. 18, стр. 274.
4. Приложение теории кристаллической структуры к явлениям спайности и роста кристаллов. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1883, ч. 18, стр. 281—283.
5. Заметка о Кунгурских пещерах. — Материалы для геологии России, т. XI. СПб., 1883, стр. 219—243.

1884

6. Заметка по поводу статьи Б. Коленко «Полярное электричество кварца. . . гемиморфизм и гемизедрия». — Горн. журн., 1884, т. IV, № 12, стр. 349—356.
7. Гомоэдрические демонстративные приборы по кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1884, ч. 19, стр. 181.
8. Наблюдения в Кунгурской «Ледяной пещере». — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1884, ч. 19, стр. 191.

¹ В основу списка положена «Библиография трудов Е. С. Федорова» А. М. Соркина. В кн. И. И. Шафрановский и Н. М. Раскин. Рукописные материалы Е. С. Федорова в Архиве АН СССР. Тр. Архива АН, вып. 14, 1957.

9. Об общих формулах проективности в работе Пфаффа о твердости минералов. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1884, ч. 19, стр. 216—217.

1885

10. Указатель статей ко второй серии «Записок С.-Петербургского минералогического общества» и «Материалов для геологии России», изданных с 1868 по 1884 г. СПб., 1885, 165 стр.
11. Этюды по аналитической кристаллографии. Этюд первый. Сущность кристаллографической проективности. — Горн. журн., 1885, т. II, № 4, стр. 87—118; № 5, стр. 222—242.
12. Начала учения о фигурах. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1885, ч. 21, стр. I—VIII, 1—277, 18 л. черт.

1886

13. Этюды по аналитической кристаллографии. Этюд второй. — Горн. журн., 1886, т. I, № 3, стр. 395—425.
14. Этюды по аналитической кристаллографии. Этюд третий. — Горн. журн., 1886, т. IV, № 12, стр. 407—454.
15. Сообщение о предлагаемых символических знаках для обозначения кристаллических форм и различных их подразделений. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1886, ч. 22, стр. 312.
16. Геологические исследования части Северного Урала Северной экспедицией в 1884 и 1885 гг. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1886, ч. 22, стр. 341—343.
17. Сведения о Северном Урале. — Изв. Русск. геогр. общ., 1886, т. XXII, стр. 255—298 с картой.
18. *Аннотация к работе*: Начала учения о фигурах. — Русск. геол. библ., 1886 (1885), т. I, стр. 73—74.
19. *Автореферат работы*: Этюды по аналитической кристаллографии. Этюд первый. — Русск. геол. библ., 1886 (1885), т. I, стр. 74—75.

1887

20. Этюды по аналитической кристаллографии. Этюд четвертый. Система кристаллографических вычислений, основанная на проективных свойствах кристаллов. — Горн. журн., 1887, т. II, № 4, стр. 87—153 с черт., 1 л. черт.
21. Попытка выразить кратким знаком символы всех равных направлений данного подразделения системы симметрии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1887, ч. 23, стр. 99—115.
22. О признаках дислокационного метаморфизма в собранных и исследованных кристаллических горных породах Северного Урала. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1887, ч. 23, стр. 326—327.

23. Несколько слов о замечательном труде А. В. Гадолина «Вывод всех кристаллографических систем из одного начала». — Зап. С.-Петербурб. минер. общ., 2-я серия, 1887, ч. 23, стр. 353—356.
24. Об установлении простых соотношений между формами всех кристаллических систем. — Зап. С.-Петербурб. минер. общ., 2-я серия, 1887, ч. 23, стр. 366—367, 373.
25. К вопросу об образовании зеленых сланцев. — Изв. Геол. ком., 1887, т. VI, № 9—10, стр. 431—438.
26. Заметка о нахождении меловых и валунных отложений в приуральской части Северной Сибири. — Изв. Геол. ком., 1887, т. VI, № 11, стр. 239—250.
27. *Автореферат работы*: Этюды по аналитической кристаллографии. Этюд второй. — Русск. геол. библ., 1887 (1886), т. II, стр. 84—85.
28. *Автореферат работы*: Этюды по аналитической кристаллографии. Этюд третий. — Русск. геол. библ., 1887 (1886), т. II, стр. 85.

1888

29. Основные формулы аналитической геометрии в улучшенном виде. СПб., 1888, 36 стр.
30. Геологическое строение части Северного Урала. — Зап. С.-Петербурб. минер. общ., 2-я серия, 1888, ч. 24, стр. 423—425.
31. О зеленых сланцах Северного Урала. — Зап. С.-Петербурб. минер. общ., 2-я серия, 1888, ч. 24, стр. 437—438.
32. О результатах четвертого геологического путешествия на Северный Урал в 1887 г. — Зап. С.-Петербурб. минер. общ., 2-я серия, 1888, ч. 24, стр. 449—450.
33. Сиеенито-гнейсы Северного Урала. — Изв. Геол. ком., 1888, т. VII, № 1, стр. 15—31.
34. Простой графический способ определения падения и простиранья пород. — Извлечение из протоколов собраний Общества горных инженеров в 1887—1888 гг. Год первый, вып. 1. СПб., 1888, стр. 56—61.
35. *Автореферат работы*: Попытка выразить кратким знаком символы всех равных направлений данного подразделения системы симметрии. — Русск. геол. библ., 1888 (1887), стр. 84—85.

1889

36. Геологические исследования в Северном Урале в 1884—1886 годах. (Отчет о деятельности геологической партии Северной экспедиции). — Горн. журн., 1889, т. II, № 4, стр. 81—147; т. II, № 5—6, стр. 307—383.
37. Симметрия конечных фигур. — Зап. С.-Петербурб. минер. общ., 2-я серия, 1889 (1888), ч. 25, стр. 1—52.

38. Две кристаллографические заметки: 1) Оси симметрии суть возможные кристаллические ребра; 2) Пояса ортогональные и изотропные. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1889 (1888), ч. 25, стр. 53—58.
39. О некоторых кристаллографических теоремах. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1889 (1888), ч. 25, стр. 348.
40. О геологических исследованиях, произведенных летом 1887 г. в Северном Урале. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1889 (1888), ч. 25, стр. 385—386.
41. Новые данные по геологии Северного Урала. — Изв. Геол. ком., 1889, т. VIII, № 1, стр. 7—20.
42. Микроскопическое исследование кристаллических пород из области 48-го листа (Мелитополь, Бердянск, Перекоп, Бериславль) десятиверстной карты Европейской России. — Тр. Геол. ком., 1889, т. IX, № 1, стр. 223—240.
43. Геологические исследования в Северном Урале в 1884—1886 годах. (Отчет о деятельности геологической партии Северной экспедиции). Окончание. — Горн. журн., 1890, т. I, № 3, стр. 498—551; т. II, № 4—6, стр. 145—210.
44. Заметка об успехах теоретической кристаллографии за последнее десятилетие. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 345—377.
45. Краткий очерк успехов теоретической кристаллографии за последние годы. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 404—406.
46. Сообщение по теории сдвигов кристаллов. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 433—445.
47. Математическое вычисление условий наисильнейшего разрушения при землетрясениях. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 445—447.
48. О напечатании статьи «Заметка об успехах теоретической кристаллографии в десятилетие 80-х годов». — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 452—453.
49. О значении работы Беке, посвященной кристаллизации виноградного сахара. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 453—454.
50. Об окончании труда «Симметрия бесконечных правильных систем фигур». — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 454—455.
51. О сооружаемом новом гониометре. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1890, ч. 26, стр. 458—460.
52. Кристаллическая форма диметилацетилентетрабромида $C_4H_6Br_4$ (нем.). — Journ. f. prakt. Chemie, Neue Folge, 1890, т. XLII, тетр. 2—3, стр. 145—147.

53. Применение гонюэдрических демонстративных приборов в кристаллографии (нем.). — Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal., 1890, т. I, стр. 234—247.
54. Автореферат работы: Геологические исследования в Северном Урале в 1884—1886 годах. — Русск. геол. библи. за 1889 г., 1890, стр. 18.
55. Автореферат работы: Две кристаллографические заметки. — Русск. геол. библи. за 1889 г., 1890, стр. 81.

1891

56. Краткое руководство по кристаллографии, ч. 1. СПб., 1891 [12], 98 стр. со схем., 1 л. черт.
57. О попытке определить расположение частиц некоторых минералов. — Вестн. естествозн., 1891, № 5, стр. 196—198.
58. Первая попытка определить расположение частиц некоторых минералов. — Горн. журн., 1891, т. I, № 1, стр. 115—132.
59. Решение задачи: по данному символу пояса и в нем одной грани, а также углу последней с другою гранью того же пояса найти символ этой другой грани. — Горн. журн., 1891, т. II, № 4—6, стр. 360.
60. Аналитическое выражение для определения относительной величины вертикальной и горизонтальной слагающих удара при землетрясениях. — Горн. журн., 1891, т. II, № 4—6, стр. 364—365.
61. Поправка к сочинению «Симметрия правильных систем фигур». Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 27, стр. 448—449.
62. Поправка к сочинениям Либиха по теоретической кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 27, стр. 449—451.
63. О сочинениях немецкого минералога Гесселя и о приоритете его в разрешении некоторых вопросов теоретической кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 27, стр. 462—464.
64. О причине образования кристаллических скелетов. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 27, стр. 464—465.
65. Попытка объяснения некоторых аномальных кристаллов изменениями их частичного строения. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 27, стр. 465—466.
66. Ответ на замечание А. Н. Карножицкого. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 27, стр. 468.
67. Симметрия правильных систем фигур. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 1—146 с табл. и рис.
68. Симметрия на плоскости. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 345—390 с табл.

69. Простое решение одной задачи математической кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 476—477.
70. Упрощенный вывод относительной величины слагающих удара при землетрясениях. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 500—501.
71. О полной коллекции гоноэдрических приборов по кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 515.
72. По поводу появившегося сочинения Шенфлиса по теоретической кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 515—519.
73. Замечание на решение Ю. В. Вульфом одной задачи по математической кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 528.
74. О лодочной съемке. — Изв. Русск. геогр. общ., 1891, т. XXVII, вып. 2, стр. 119—135 со схем.
75. О двух своих сочинениях: 1) Симметрия конечных фигур; 2) Симметрия правильных систем фигур (нем.). Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal., 1891, т. I, стр. 113—116.
76. Об одном замечательном свойстве анортита (нем.). Tschermak's Min. u. Petr. Mittheil., Neue Folge, 1891, т. XII, тетр. 5, стр. 443—444. См. также: Neues Jahrb. f. Min., 1891, т. II, стр. 68—69.
77. Новый метод оптического исследования кристаллических пластинок в параллельном свете (нем.). Tschermak's Min. u. Petr. Mittheil., Neue Folge, 1891, т. XII, тетр. 6, стр. 505—509 с фиг.
78. *Автореферат работы*: Математическое вычисление условий наисильнейшего разрушения при землетрясениях. — Русск. геол. библ. за 1890 г., 1891, стр. 76.
79. *Автореферат работы*: Сообщение по теории сдвигов кристаллов. — Русск. геол. библ. за 1890 г., 1891, стр. 96—97.
80. *Автореферат работы*: О сооружаемом новом гониометре. — Русск. геол. библ. за 1890 г., 1891, стр. 97.
81. *Автореферат работы*: Простой графический способ определения падения и простираания пород. — Русск. геол. библ. за 1890 г., 1891, стр. 185.
82. *Перевод*: Макс Бауер. О параморфозах рутила по анатазу. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1891, ч. 28, стр. 147—168.

1892

83. Простой способ вычерчивания весьма пологих дуг. СПб., 1892, 6 стр.
84. А. В. Гадолин. (Некролог). — Горн. журн., 1892, т. IV, № 12, стр. 558—563.

85. О компараторе Мишеля Леви и об универсальном столике. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1892, ч. 29, стр. 171—173.
86. Сообщения: 1) О наблюдениях при параллельных николях; 2) Важнейшие определения, совершаемые при помощи универсального столика; 3) Оптические константы анортита. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1892, ч. 29, стр. 190—193.
87. О новом способе определения коэффициентов преломления; об исследовании плагиоклазов и о линейке Вульфа для вычерчивания весьма пологих дуг. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1892, ч. 29, стр. 205—209.
88. Геологические исследования в северо-западной части 85-го листа десятиверстной карты России. — Изв. Геол. ком., 1892 (1893), т. XI, стр. 199—208.
89. Об одном замечательном свойстве анортита (нем.). *Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal.*, 1892, т. II, стр. 68—69.
90. Микроскопические наблюдения при параллельном положении николей (нем.). *Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal.*, 1892, т. II, стр. 69—70.
91. Сопоставление кристаллографических результатов г-на Шенфлиса с моими (нем.). *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1892, т. XX, тетр. 1, стр. 25—75.
92. Решение некоторых задач в стереографической проекции (нем.). *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1892, т. XX, тетр. 4, стр. 357—361.
93. Об одном замечательном свойстве анортита (нем.). *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1892, т. XX, тетр. 4, стр. 362.
94. Применение гоноздрических демонстративных приборов в кристаллографии (нем.). *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1892, т. XXI, тетр. 1—2, стр. 115—116.

1893

95. Проблема минимум в учении о симметрии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1893, ч. 30, стр. 41—74.
96. Основания морфологии и систематики многогранников. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1893, ч. 30, стр. 241—341.
97. Некролог по поводу смерти А. В. Гадолина. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1893, ч. 30, стр. 405—412.
98. О 100-летней годовщине со дня рождения Н. И. Лобачевского. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 1893, ч. 30, стр. 455.
99. Исследование порошка золота, полученного действием азотной кислоты на амальгаму золота. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1893, ч. 30, стр. 455—458.
100. Сообщение о новой кристаллографической номенклатуре. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1893, ч. 30, стр. 458—459.

101. О приоритете русских ученых в открытии черного алмаза. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1893, ч. 30, стр. 465.
102. Аксель Вильгельмович Гадолин. (Некролог). — Изв. Геол. ком., 1893, т. XII, № 8—9, стр. 1—6.
103. О преподавании минералогии в высших учебных заведениях и особенно в Горном институте. — Изв. Общ. горн. инж., 1893, № 5, стр. 12—21.
104. Библиография по кристаллографии, минералогии и петрографии. — Изв. Общ. горн. инж., 1893, № 5, стр. 37—42.
105. Теодолитный метод в минералогии и петрографии. — Тр. Геол. ком., 1893, т. X, № 2, стр. 1—191, 6 л. черт.
106. Об универсальном гониометре (нем.). — Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal., 1893, т. II, стр. 69—70.
107. Кристаллическая форма диметилацетилентетрабромиды, $C_4H_6Br_4$ (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1893, т. XXI, тетр. 4, стр. 399.
108. Универсально-теодолитный метод в минералогии и петрографии. Ч. I. Универсально-гонометрические исследования (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1893, т. XXI, тетр. 5—6, стр. 574—678, 3 л. табл.
109. Начала учения о фигурах (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1893, т. XXI, тетр. 5—6, стр. 679—694.
110. Этюды по аналитической кристаллографии (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1893, т. XXI, тетр. 5—6, стр. 694—714.
111. Универсально-теодолитный метод в минералогии и петрографии. Ч. II. Кристаллооптические исследования (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1893, т. XXII, тетр. 3, стр. 229—268, 1 л. табл.

1894

112. Основной закон кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1894, ч. 31, стр. 171—189.
113. Сообщение об основном законе кристаллографии. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1894, ч. 31, стр. 350.
114. О вновь вышедших книгах: Б. Хехт «Руководство по вычислениям кристаллов» и Л. Флетчер «Оптическая индикатриса». — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1894, ч. 31, стр. 364—367.
115. Геологические исследования юго-западной части области 89-го листа 10-верстной карты. — Изв. Геол. ком., 1894, т. XIII, стр. 75—81.
116. Одна теорема Начал Эвклида, выраженная в общей форме (франц.). — Bull. des sciences mathém., Paris, 2-е série, 1894, т. XVIII, ч. 1, стр. 59—64.

117. Новые приборы для геометрических и оптических исследований кристаллов (франц.). — *Mémoires de l'Acad. des Sciences*, 7-e série, 1894, т. XLII, № 1, стр. 1—27.
118. Проблема минимум в учении о симметрии (нем.). — *Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal.*, 1894, т. I, тетр. 1, стр. 56—78.
119. Еще одно слово по поводу положения, согласно которому оси симметрии всегда должны быть возможными ребрами (нем.). — *Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal.*, 1894, т. I, тетр. 2, стр. 199—200.
120. Возражения на замечания Эдмунда Гесса к «Началам учения о фигурах» Е. С. Федорова (нем.). — *Neues Jahrb. f. Min., Geol. u. Pal.*, 1894, т. II, тетр. 1, стр. 86—88.
121. Минералогические наблюдения на Северном Урале (нем.). — *Tschermak's min. u. petr. Mittheil.*, 1894, т. XIV, тетр. 1, стр. 85—91; тетр. 2, стр. 143—155.
122. Основной закон кристаллографии (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1894, т. XXIII, тетр. 1—2, стр. 99—113.
123. К определению полевых шпатов и кварца в тонких шлифах (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1894, т. XXIV, тетр. 1—2, стр. 130—132.
124. Символы Миллера являются единственно допустимыми символами (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1894, т. XXIV, тетр. 1—2, стр. 132—136.
125. Мотивы, руководившие при составлении программы минералогии. Протоколы Специальной комиссии по вопросу преподавания естествознания в технических школах. Средний отдел (мир неорганический). СПб., 1893—1894.
126. Понятие о плоскости симметрии. Добавление к курсу минералогии. Протоколы Специальной комиссии. . . СПб., 1893—1894.
127. Существенные и несущественные цвета. Протоколы Специальной комиссии. . . СПб., 1893—1894.
128. Программа минералогии (для средних технических школ). Протоколы Специальной комиссии. . . СПб., 1893—1894.

1895

129. Минералогические и петрографические наблюдения (нем.). — *Tschermak's min. u. petr. Mittheil.*, *Neue Folge*, 1895, т. XIV, тетр. 6, стр. 545—553.
130. О псевдохроизме и псевдодихроизме (нем.). — *Tschermak's min. u. petr. Mittheil.*, *Neue Folge*, 1895, т. XIV, тетр. 6, стр. 569—571.
131. Теория структуры кристаллов. Введение. Правильные системы точек (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1895, т. XXIV, тетр. 3, стр. 209—252 с табл.
132. Простейшая форма универсального столика (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1895, т. XXIV, тетр. 6, стр. 602—603.

133. Простой способ определения абсолютного оптического знака неправильного минерального зернышка в тонких шлифах (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1895, т. XXIV, тетр. 6, стр. 603—605.
134. О значении параметров, определяющих комплексы кристаллических граней (элементы кристалла) (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1895, т. XXIV, тетр. 6, стр. 605—610.
135. Сечения в плагиоклазах, перпендикулярные оптическим осям (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1895, т. XXV, тетр. 1, стр. 94—95.
136. Теория структуры кристаллов. Часть I. Возможные виды структур (с наглядным графическим изображением симморфных видов структур) (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1895, т. XXV, тетр. 2—3, стр. 113—224 со схем., 1 л. табл.
137. Оптические сообщения (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1895, т. XXV, тетр. 4, стр. 349—356.

1896

138. Детальная геологическая съемка Богословского горного округа. Пермь, 1896, 25 стр.
139. Геологические исследования в Северном Урале в 1887—1889 годах. (Отчет о деятельности геологической партии Северной экспедиции). — *Горн. журн.*, 1896, т. II, № 4—6, стр. 51—69, 188—249, 321—364; т. III, № 7, стр. 52—98.
140. Рецензия на сочинения А. Н. Карножицкого: 1) «О природе и происхождении вицинальных плоскостей кристаллов» и 2) «Евгение-Максимилиановские минеральные копи». — *Зап. С.-Петербур. минер. общ.*, 2-я серия, 1896, ч. 24, вып. 2, стр. 70—84.
141. О новой группе изверженных пород. — *Изв. Моск. с.-х. инст.*, 1896, кн. 1, стр. 168—187.
142. Универсальный метод и изучение полевых шпатов. I. Методические приемы (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1896, т. XXVI, тетр. 3, стр. 225—261, 1 л. табл.
143. Универсальный метод и изучение полевых шпатов. II. Определения полевых шпатов (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1896, т. XXVII, тетр. 4, стр. 337—398 со схем., 1 л. табл.

1897

144. Курс кристаллографии. Изд. 2. СПб., 1897, XVI, 375 стр. со схем., 1 л. табл.
145. Основания петрографии. СПб., 1897. 236 стр. с рис., 5 л. табл.
146. Геологические исследования в Северном Урале в 1887—1889 годах. (Отчет о деятельности геологической партии Северной экспедиции). III. Исследования на Западном склоне Урала. 1888 год. — *Горн. журн.*, 1897, т. III, № 9, стр. 337—375.

147. Пояснения к геологической карте, приложенной к отчету профессора Е. С. Федорова. — Горн. журн., 1897, т. IV, № 12, стр. 378—387.
148. Результаты геологических исследований 1897 года в Богословском горном округе. — Ежегодник по геол. и минер. России, 1897, т. II, вып. 6—7, стр. 123—127.
149. Некоторые рассуждения об основных вопросах кристаллографии (нем.). — *Sitzungsber. d. math.-phys. Cl. d. Bayer. Akad. d. Wiss.*, 1897 (1896), т. XXVI, стр. 499—530.
150. К учению о сингониях (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1897, т. XXVIII, тетр. 1, стр. 36—68.
151. О плотнейшей правильной системе шаров (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1897, т. XXVIII, тетр. 3, стр. 232—238.
152. Гранат из Турьинских рудников (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1897, т. XXVIII, тетр. 3, стр. 276—290.
153. Дополнительные этюды по учению о симметрии (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1897, т. XXVIII, тетр. 4—5, стр. 468—482.
154. Опыт теории термодинамики кристаллов (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1897, т. XXVIII, тетр. 4—5, стр. 483—501.

1898

155. Геологические исследования в Северном Урале в 1887—1889 гг. (Отчет о деятельности геологической партии Северной экспедиции). СПб., 1898, 216 стр.
156. Докладная записка, представленная в Правление Горнозаводского богословского товарищества. — Горн. журн., 1898, т. IV, № 11, стр. 238—244.
157. По поводу брошюры С. Шипковского «Рудные месторождения Урала». (Париж). — Горн. журн., 1898, т. IV, № 11, стр. 249—252.
158. Точное графическое решение вопросов сферической тригонометрии. — Зап. Русск. техн. общ., 1898, № 4, стр. 167—183.
159. О петрографической номенклатуре. — Изв. Моск. с.-х. инст., 1898, кн. 3, стр. 390—400.
160. Некоторые практические результаты детальной геологической съемки Богословского горного округа. — Изв. Общ. горн. инж., 1898, № 5, стр. 27—42.
161. Оси упругости полевых шпатов (нем.). — *Tschermak's min. u. petr. Mittheil.*, Neue Folge, 1898, т. XVIII, тетр. 4, стр. 360—366.
162. Универсальный метод и изучение полевых шпатов. III. Полевые шпаты Богословского горного округа (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1898, т. XXIX, тетр. 5—6, стр. 604—658 со схем. и табл.

163. Об изображениях кристаллов (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1898, т. XXX, тетр. 1, стр. 9—16.
164. Об изоморфизме (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1898, т. XXX, тетр. 1, стр. 17—22.
165. Об особом роде оптических аномалий и структуре типа песочных часов (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1898, т. XXX, тетр. 1, стр. 68—70.
166. *Реферат*: В. Вернадский. «Явления скольжения (сдвига) кристаллического вещества». — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1898—1899, т. III, отд. 4, стр. 9—11.
167. *Реферат*: С. Шиковский. «Происхождение рудных месторождений Урала». — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1898—1899, т. III, отд. 4, стр. 17—18.

1899

168. Докладная записка о практических результатах детальной геологической съемки Богословского горного округа. 1899. (Совместно с В. В. Никитиным).
169. Об изучении химизма минералов и горных пород. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1899, ч. 37, вып. 2, стр. 269—310, 20 л. табл.
170. О минералах Богословского горного округа. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1899, т. III, № 7—8, стр. 79—103. (Совместно с В. В. Никитиным).
171. Памяти П. В. Еремеева. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1899, т. III, № 7—8, стр. 139.
172. П. В. Еремеев как минералог. Библиографический очерк. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1899, т. III, № 9, стр. 141—150.
173. Результаты изучения полевых шпатов (нем.). — *Sitzungsber. d. math. — phys. Cl. d. Akad. d. Wiss. zu München*, 1899 (1898), т. XXVIII, стр. 55—58.
174. Из области гипотетического (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1899, т. XXXI, тетр. 1, стр. 17—20.
175. Новое понятие о сингонии, являющееся одним из основных понятий в кристаллографии (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1899, т. XXXI, тетр. 1, стр. 21—23.
176. Констатирование оптических аномалий в плагиоклазах. — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1899, т. XXXI, тетр. 6, стр. 579—582, 1 л. табл.
177. Псевдоабсорбция (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1899, т. XXXII, тетр. 2, стр. 128—130, 1 л. табл.
178. Закон зон Вейса и новая кристаллография (без вычислений) (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1899, т. XXXII, тетр. 2, стр. 131—151 со схем.

1900

179. Геологические исследования летом 1900 г. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1900—1901, т. IV, отд. 1, стр. 135—140.
180. Новые приспособления к поляризационному микроскопу. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1900—1901, т. IV, отд. 1, стр. 142—149.
181. Естественная классификация и символизация химических составов изверженных горных пород. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1900, ч. 28, вып. 2, стр. 395—446, 2 л. табл.
182. О строении Меднорудянского рудника и о генезисе его медных руд. — Изв. Общ. горн. инж., 1900, № 4, стр. 1—9.
183. Правильное выполнение плоскости и пространства (нем.). — Abhandl. d. Bayer. Akad. d. Wiss., math.-phys. Cl., München, 1900 (1899), т. XX, ч. 2, стр. 465—588, 13 л. табл.
184. О петрографической номенклатуре (франц.). VIII Congrès géologique international. Compte rendu, v. I. Paris, 1900, стр. 226—238.
185. Микроскопическое определение периклинового закона (нем.). Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1900, т. XXXII, тетр. 3, стр. 246—249, 1 л. табл.
186. К зональной кристаллографии. I. Особый ход зонального развития форм. II. Универсальный гониометр больше чем с двумя осями вращения и точное решение задач графическим путем (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1900, т. XXXII, тетр. 5, стр. 446—492, 1 л. илл.
187. Крайний случай зональности плагиоклазов (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1900, т. XXXIII, тетр. 2, стр. 127—132, 2 л. табл.
188. К зональной кристаллографии. III. Закон эллипсоида сингонии (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1900, т. XXXIII, тетр. 6, стр. 555—588.
189. К теории кристаллографических проекций (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1900, т. XXXIII, тетр. 6, стр. 589—598.
190. *Реферат:* Л а п п а р а н. Минералогия. — Ежегодн. по геол. и минерал. России, 1900—1901, т. IV, отд. 4, стр. 1—5.

1901

191. Богословский горный округ. Описание в отношении его топографии, минералогии, геологии и рудных месторождений. СПб., 1901, VIII, 11, 175, 127, 104 стр. со схем. (Совместно с В. В. Никитиным).
192. Курс кристаллографии. Изд. 3, заново перераб. СПб., 1901, III, 438 стр. со схем., 3 л. табл.

193. Наблюдения и опыты по кристаллогенезису. Краткое сообщение. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1901, т. XV, № 5, стр. 519—534.
194. Кедабекит и виолаит. — Изв. Моск. с.-х. инст., 1901, кн. 1, стр. 43—47.
195. Замечание, касающееся статьи г-на Суза де Брандао «О кристаллографических системах» (нем.). — *Centralblatt f. Min., Geol. u. Pal.*, 1901, № 18, стр. 545—546.
196. Об универсальном гониометре больше чем с двумя осями вращения (нем.). — *Mechaniker*, Berlin, 1901, IX, стр. 145—147.
197. К зональной кристаллографии. IV. Зональные символы и правильная установка кристаллов (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1901, т. XXXIV, тетр. 2, стр. 133—157 со схем.
198. К зональной кристаллографии. V. Законы компликации и правильная установка кристаллов. Приложение: правильная установка пироксенов и отношение их структуры к структуре амфиболов (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1901, т. XXXV, тетр. 1—2, стр. 25—74, 3 л. табл.
199. К зональной кристаллографии. VI. Зональные отношения берилла и кристаллов гипогексального типа вообще (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1901, т. XXXV, тетр. 1—2, стр. 75—148, 4 л. табл.

1902

200. Некоторые практические результаты из исследований коллекций Закавказья и Забайкальской области. — *Горн. журн.*, 1902, т. IV, № 11, стр. 233—240.
201. Оптические приборы, основанные на применении пакетов стеклянных пластинок. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1902, т. V, вып. 8, стр. 217—221.
202. Иван Васильевич Мушкетов. Биографический очерк. Ежегодн. по геол. и минер. России, 1902, т. VI, вып. 1, стр. 1—22.
203. Описание нескольких интересных кристаллов. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1902, т. XVII, № 1, стр. 91—100, 2 л. табл.
204. Иван Васильевич Мушкетов. Биографический очерк. — Изв. С.-Петербур. биол. лаборат., 1902, т. VI, вып. 2, стр. 5—27.
205. Теория структуры кристаллов. Ч. II. Ретикулярная плотность и опытное определение кристаллической структуры (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1902, т. XXXVI, тетр. 3, стр. 209—233.
206. Зональная кристаллография и теория структуры кристаллов (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1902, т. XXXVII, тетр. 1, стр. 22—49 со схем.
207. О применении треножного циркуля для кристаллографических целей (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1902, т. XXXVII, тетр. 2, стр. 138—142.

208. Виды дисперсии оптических осей и определение их (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1902, т. XXXVII, тетр. 2, стр. 143—150.

1903

209. К статье «Некоторые практические результаты исследования Закавказской и Забайкальской коллекции». Таблица и объяснения к ней. — Горн. журн., 1903, т. I, № 1, прил., 1 л. табл.
210. Оптические определения или химический анализ? — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1903, т. VI, вып. 2—3, стр. 63—71.
211. О мезосферических многогранниках. — Зап. Акад. наук по Физ.-мат. отд., 1903, т. XIV, № 1, стр. 1—40, 10 л. табл.
212. Критический пересмотр форм кристаллов минерального царства. (Материалы по молекулярной статике однородных твердых тел) — Зап. Акад. наук по Физ.-мат. отд., 1903, т. XIV, № 2, стр. 1—148, 5 л. табл.
213. Горные породы Кедабека. — Зап. Акад. наук по Физ.-мат. отд., 1903, т. XIV, № 3, стр. 1—51, 3 л. табл.
214. О содержании статьи «Последние шаги в деле универсально-оптических исследований. Применение к полевым шпатам». — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1903, ч. 40, вып. 2, стр. 80.
215. Об определении по универсальному методу всех трех показателей преломления в минералах петрографических препаратов. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1903, ч. 40, вып. 2, стр. 89—93.
216. Отзыв о сочинении В. И. Воробьева «Кристаллографические исследования турмалина с Цейлона и из некоторых других месторождений» — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1903, ч. 40, вып. 2, стр. 102—105.
217. Краткое сообщение о результатах минералогического и петрографического исследования берегов Белого моря. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1903, ч. 40, вып. 2, стр. 211—220.
218. Последние шаги в деле универсально-оптических исследований. Применение к полевым шпатам. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1903, ч. 40, вып. 2, стр. 221—261.
219. Определение показателей преломления в тонких шлифах. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1903, ч. 40, вып. 2, стр. 305—361.
220. Влияние вытесняющих примесей на кристаллизацию. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1903, ч. 40, вып. 2, стр. 363—380.
221. Новые, неустойчивые разности семиводных цинковой и никелевой солей серной кислоты. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1903, т. XVIII, № 1, стр. 15—19.

222. Влияние капиллярного, теплового и электрического токов на кристаллогенезис. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1903, т. XVIII, № 2, стр. 53—63.
223. Один из самых общих законов кристаллизации. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1903, т. XVIII, № 4, стр. 155—160.
224. Об условиях научной деятельности в нашем отечестве. (Письмо в редакцию). — Русские ведомости, 1903, № 253.
225. Заметка относительно кристаллизации калаверита (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1903, т. XXXVII, тетр. 6, стр. 611—618.

1904

226. Минералогическое и петрографическое описание берегов Белого моря. — Горн. журн., 1904, т. II, № 4, стр. 98—127; № 5, стр. 196—242; т. III, № 7, стр. 80—114.
227. Кристаллические превращения и рост в твердой среде. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1904—1905, т. VII, отд. 1, стр. 140—144.
228. Кристаллизация расплавленного вещества, отчасти разлагающегося при плавлении. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1904—1905, т. VII, отд. 1, стр. 151—158.
229. О новом способе определения толщины пластинок, взятых из микроскопических препаратов. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1904, ч. 41, вып. 1, стр. 8—9.
230. Проблема минимум в учении о мезосферических многогранниках. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1904, т. XXI, № 1, стр. 33—72, 1 л. табл.
231. Проблема минимум в учении о симметрии. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1904, т. XXI, № 1, стр. 73—77.
232. Особенно интересный случай кристаллогенезиса. Пример соли состава $C_{12}H_{17}NC_{10}H_{15}BrSO_4$. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1904, т. XXI, № 1, стр. 79—84. Доложено на заседании Физико-математического отделения Академии наук 1 сентября 1904 г.
233. О кристаллизации соли состава $C_{22}H_{32}NSO_4Br$ ($C_{12}H_{17}NC_{10}H_{15}BrSO_4$). — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1904, т. XXI, № 2, стр. 103—109, 1 л. табл.
234. Опыт, наглядно демонстрирующий непрерывность кристаллизации. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1904, т. XXI, № 2, стр. 111—112.
235. Некоторые следствия из закона эллипсоида сингонии. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1904, т. XXI, № 2, стр. 113—140, 1 л. табл.
236. Из итогов тридцатипятилетия. Речь, произнесенная в годовичном собрании Московского сельскохозяйственного института

- 26 сентября 1904 г. — Речь и отчет, читанные в годовичном собрании Моск. с.-х. инст. 26 сентября 1904 г. М., 1904, стр. 1—15.
237. 10-летие Минералогического кабинета Московского сельскохозяйственного института. — Речь и отчет, читанные в годовичном собрании Моск. с.-х. инст. 26 сентября 1904 г. М., 1904, стр. 15—21.
238. Записка Е. С. Федорова (об инженерном отделении Сельскохозяйственного института). — Изв. Моск. с.-х. инст., т. 10, кн. 4, 1904, стр. 151—153.
239. Самые общие законы кристаллизации и основанная на них однозначная установка кристаллов (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1904, т. XXXVIII, тетр. 4—5, стр. 321—490 с фиг., 2 л. табл.
- 1905
240. Полиаргит и полиаргитизация. — Горн. журн., 1905, т. II, № 5, стр. 237—244.
241. Эрнит (Oehrnit) и иттрокальцит, новые минеральные виды. — Горн. журн., 1905, т. III, № 8, стр. 264—271.
242. Кристаллы пушкинита из Верх-Исетской дачи. — Горн. журн., 1905., т. IV, № 11, стр. 208—245. (Совместно с В. М. Колачевским).
243. Важность применения стереографической линейки. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1905—1906, т. VIII, отд. 1, стр. 26—30 со схем.
244. Попытка лабораторной эпидотизации граната. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1905—1906, т. VIII, отд. 1, стр. 33—35.
245. Поездка в Малый Кавказ летом 1906 года. — Ежегодн. по геол. и минер. России, 1905—1906, т. VIII, отд. 1, стр. 268—269.
246. Новые особые точки стереографической проекции в связи с расширением понятия об изотропных пучках лучей. — Зап. Акад. наук по Физ.-мат. отд., 1905, т. XVII, № 5, стр. 1—8 с фиг.
247. Как обезвредить эксцентриситет дешевых универсальных гониометров? — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1905, ч. 43, вып. 1, стр. 191—205 с черт.
248. О кристаллах некоторых соединений ароматических пиридинов. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1905, ч. 43, вып. 1, стр. 207—236 со схем.
249. Два полиморфа йода. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1905, т. XXII, № 4—5, стр. 287—293 с фиг.
250. Заметка о нефелиновых породах с Белого моря. — Изв. Акад. наук, 5-я серия, 1905, т. XXIII, № 1—2, стр. 149—152.

251. О горных породах берегов Белого моря и Мурмана. — Памяти И. В. Мушкетова. Сб. статей по геологии. СПб., 1905, стр. 115—129.
252. Заметка, касающаяся одной проблемы минимум в учении о фигурах (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1905, т. XL, тетр. 1—2, стр. 277—279.
253. Некоторые следствия из закона эллипсоида сингонии (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1905, т. XL, тетр. 4, стр. 332—356.
254. Теория структуры кристаллов. Ч. III. О главных структурных видах кристаллов кубического типа и о структуре циркона (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1905, т. XL, тетр. 6, стр. 529—554.
255. Эллипсоид сингонии является эллипсоидом инерции кристаллического вещества (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1905, т. XLI, тетр. 2, стр. 151—156.
256. Об отношении между кристаллографией и теорией чисел (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1905, т. XLI, тетр. 2, стр. 162—163.

1906

257. Крайнее упрощение зональных вычислений и кристаллографических вычислений вообще. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1906, ч. 44, вып. 1, стр. 199—242 с черт.
258. Сферотригонометр (прибор для точного решения графическим путем задач кристаллографии и сферической тригонометрии). — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1906, ч. 44, вып. 1, стр. 257—297 с илл. и черт.
259. Кристаллизация лансфордита, дистена, нептунита и титана. — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1906, ч. 44, вып. 1, стр. 299—325.
260. Перфекционизм. — Изв. С.-Петербур. биол. лаборат., 1906, т. VIII, вып. 1, стр. 25—65; вып. 2, стр. 9—67.
261. Учение о сингониях (нем.). — *Abhandl. d. Bayer. Akad. d. Wiss. math.-phys. Cl.*, 1906, т. XXIII, ч. 1, стр. 1—88, 1 л. табл.
262. О кристаллизации и некоторых физических свойствах двух соединений из класса ксантогеновых амидов (тиоуретанов). *Bull. de la Société des natur. de Moscou*, 1906 (1905), № 1—2, стр. 110—132. (Совместно с Д. Н. Артемьевым).
263. Кристаллизация кварцита и кальцита (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1906, т. XLI, тетр. 5, стр. 455—469.
264. Простейшее доказательство положения, служащего для определения главных типов структур (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1906, т. XLI, тетр. 5, стр. 478—480.

265. Специальное испытание закона кристаллографических пределов (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1906, т. XLII, тетр. 1, стр. 8—12.

1907

266. Новая геометрия как основа черчения. Составлена на основе лекций, читанных в Горном институте в начале 1906 г. СПб., 1907, VIII, 135 стр. с рис., 3 л. табл.
267. Химические отношения горных пород и их графическое изображение. — Зап. Горн. инст., 1907, т. I, вып. 1, стр. 1—19, 2 л. табл.
268. Точное изображение точек пространства на плоскости. — Зап. Горн. инст., 1907, т. I, вып. 1, стр. 52—79 со схем., 1 л. табл.
269. Вывод одной из основных формул учения о симметрии. — Зап. Горн. инст., 1907, т. I, вып. 1, стр. 79—80.
270. Каломель из Никитовки. — Зап. Горн. инст., 1907, т. I, вып. 1, стр. 81.
271. Опыты, наглядно демонстрирующие значительное различие в растворимости разных граней. — Зап. Горн. инст., 1907, т. I, вып. 1, стр. 81—83.
272. Извлечение из отзыва о труде А. К. Болдырева «Основы геометрического учения о симметрии». — Зап. С.-Петерб. минер. общ., 2-я серия, 1907, ч. 45, стр. 417—424.
273. Испытание закона пределов на мурзинските (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1907, т. XLIII, тетр. 1, стр. 36—38.

1908

274. Этюды по геометрии шаров. Сфероколлинеация; реципрочные преобразования; мегасферы векториальных и обыкновенных шаров. Мегасферы параллельных векторов. Полярные отношения мегасфер. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 2, стр. 102—142.
275. Коллинеарные системы в положении перспективном, но не инволюции. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 2, стр. 143—146.
276. Системы гармонических отрезков и векторов. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 2, стр. 147—159.
277. Цинк, содержащий троилит, как продукт заводского возгона. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 2, стр. 160.
278. Различная растворимость граней и ее проявление в минеральном царстве. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 2, стр. 160—163.
279. Интересные образцы калистых полевых шпатов в Музее Горного института. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 2, стр. 163—165.

280. О реципрочных кривых и поверхностях. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 3, стр. 171—174.
281. Сферические системы. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 3, стр. 175—182 с табл.
282. Баритокальцит и псевдоморфоза по нем барита. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 3, стр. 182—185, 1 л. табл.
283. Естественные фигуры вытравливания на топазе. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 3, стр. 186—191, 3 л. табл.
284. Кристаллы Минералогического музея. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 3, стр. 192—223, 4 л. табл.
285. Сомнительный двойник авгита из Монте-Росси. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 3, стр. 233.
286. Усовершенствование критерия правильной установки кристаллов. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 3, стр. 234.
287. Изображение структуры кристалла векториальными кругами. Диаграмма структуры. Определение плотности сеток. Усовершенствование критерия правильной установки. Диаграмма полярной решетки. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 4, стр. 279—294, 1 л. табл.
288. Построение кривой поверхности 2-го порядка (коносекунды) по мнимым парам точек или мнимому коническому сечению. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 4, стр. 302—304.
289. Построение кривых поверхностей второго порядка (коносекунд) и полный шестигранник. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 4, стр. 305—312.
290. Заметка об одном свойстве стереографической проекции. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 4, стр. 316—317.
291. Гипопараллельный сросток арагонита из Билина. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 4, стр. 317—318.
292. Возможность разных геометрических систем при одной и той же полной совокупности элементов. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 5, стр. 319—321.
293. Существование безграничного множества геометрических систем. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 5, стр. 322—342.
294. Следы проявления триклинной сингонии в ортоклазе. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 5, стр. 392—394 с фотогр.
295. К вопросу о происхождении двойниковых полосок в микроклине. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 5, стр. 394.
296. Линейная прима кривых поверхностей 2-го порядка (коносекунд), определяемая одною из них и плоскостью. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 5, стр. 394—396.
297. Сдвиг обыкновенных и полярных решеток. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 5, стр. 396—397.

298. Опыты по кристаллизации между двумя сферами. — Зап. Горн. инст., 1908, т. I, вып. 5, стр. 397—399.
299. Отзыв проф. Е. С. Федорова о кандидатах на замещение кафедры минералогии в Екатеринославском высшем горном училище. — Изв. Екатеринославск. высш. горн. училища, 1908, вып. 2, стр. 23—25.
300. Белое море как источник материала для сельскохозяйственной культуры. — Изв. Моск. с.-х. инст., 1908, кн. 1, стр. 94—97.
301. О постановке детальной геологической съемки России по частной инициативе. — Тр. I Всероссийск. съезда деятелей по практич. геологии и разведочн. делу, состоявшегося в 1903 г. СПб., 1908, стр. 71—82.
302. О нормальном ходе преподавания цикла минералогических наук в высших горных школах. — Тр. I Всероссийск. съезда деятелей по практич. геологии и разведочн. делу, состоявшегося в 1903 г. СПб., 1908, стр. 445—456.

1909

303. Генезис авгитогранатовых пород по новым данным. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 1, стр. 48—68 со схем., 2 л. фотогр. (Совместно с Е. Д. Стратоновичем).
304. Полный четырехсторонник в кристаллографии и графический прием нахождения сложных индексов. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 1, стр. 72—73.
305. Один из существенных числовых законов геометрической сети развития форм. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 1, стр. 74—76.
306. Тетраэдрическая геометрическая сеть и ее развитие по пяти точкам. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 1, стр. 76—77.
307. Простое и точное изображение точек пространства 4-х измерений на плоскости посредством векторов. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 3, стр. 213—240 с фиг.
308. Тонкопластинчатые кристаллы брукита. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 3, стр. 253.
309. Интересный кристалл апатита, спутника нептунита из Калифорнии. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 3, стр. 253—254.
310. К влиянию примесей при кристаллизации между сферами. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 3, стр. 254—255.
311. Экспериментальное решение вопроса о генезисе вициналоидов. Скучивание. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 3, стр. 255—256.
312. Неравномерность в распределении способности кристаллизации и изоморфизм. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 3, стр. 256—259.

313. О составлении таблиц для кристаллохимического анализа. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 3, стр. 259—261.
314. Кристаллы Минералогического музея (продолжение). — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 4, стр. 285—328 со схем., 6 л. табл.
315. К статистике распределения кристаллов по их основным свойствам. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 4, стр. 329.
316. Новые приобретения минералогического института. — Зап. Горн. инст., 1909, т. II, вып. 4, стр. 330—332 с рис.
317. Параллелоэдры в канонической форме и их однозначные отношения к пространственным решеткам (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1909, т. XLVI, тетр. 3, стр. 245—260 с фиг., 2 л. табл.

1910

318. Сокращенный курс кристаллографии. СПб., 1910, 276 стр. с фиг., 3 л. черт.
319. Дополнительные замечания к статье Соколова и Артемьева об определении плотности сеток. — Зап. Горн. инст., 1910, т. II, вып. 5, стр. 341—345.
320. Кристаллография за сорок лет. — Зап. Горн. инст., 1910, т. II, вып. 5, стр. 364—375.
321. Родственные геометрические системы. — Зап. Горн. инст., 1910, т. II, вып. 5, стр. 376—385.
322. Несколько формул, относящихся к системе зональных вычислений. — Зап. Горн. инст., 1910, т. II, вып. 5, стр. 394—395.
323. Соображения о законах двойников. — Зап. Горн. инст., 1910, т. II, вып. 5, стр. 395—396.
324. Приближенное деление окружности круга на равные части лучами из центра. — Зап. Горн. инст., 1910, т. II, вып. 5, стр. 396—397.
325. Выражение двойного преобразования символов. — Зап. Горн. инст., 1910, т. II, вып. 5, стр. 397—398.
326. Завершение вывода канонических параллелоэдров. — Зап. Горн. инст., 1910, т. III, вып. 1, стр. 88—97.
327. Тожественные пространственные решетки при разных символах комплекса. — Зап. Горн. инст., 1910, т. III, вып. 1, стр. 98—99.
328. Кристаллизация барита и порядок расчета установки вообще. — Зап. Горн. инст., 1910, т. III, вып. 1, стр. 99.
329. Замечания к статье Г. Вульфа (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1910, т. XLVII, тетр. 5—6, стр. 647.
330. Дополнительные замечания к статье В. И. Соколова и Д. Н. Артемьева «Непосредственное определение плотности сеток кри-

сталлических граней по таблицам» (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1910, т. XLVIII, тетр. 4, стр. 391—399.

331. Завершение в развитии понятия канонического параллелоэдра (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1910, т. XLVIII, тетр. 4, стр. 400—416.
332. Призыв к господам коллегам (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1910, т. XLVIII, тетр. 5, стр. 514.

1911

333. Несколько упрощенных приемов при графическом решении задач кристаллографии. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, вып. 2, стр. 141—149 со схем.
334. Начало применения кристаллохимического анализа. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 2, стр. 150—157.
335. Псевдоморфоза малахита по атакамиту из Богословского горного округа. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 2, стр. 158.
336. Энигматические грани кварца. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 2, стр. 170.
337. Бенитоит вместо апатита. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 2, стр. 170.
338. Существенное усовершенствование графических схем трехугольной и тетраэдрической. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 3—4, стр. 188—192 с фиг.
339. Мистика круга Фейербаха (*Circulus mysticus Feuerbachii*). — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 3—4, стр. 284—286.
340. О специальных кругах и шарах. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 3—4, стр. 287—291.
341. Сферические совокупности кривых 2-го порядка (коноприм). — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 3—4, стр. 292—308 с фиг.
342. О системах, коих линейные примы определяются тремя элементами. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 3—4, стр. 309—314.
343. Влияние толщины слоя раствора на кристаллизацию. — *Зап. Горн. инст.*, 1911, т. III, вып. 3—4, стр. 319.

1912

344. Симметрия линейных совокупностей кривых 2-го порядка (коноприм). — *Зап. Горн. инст.*, 1912, т. III, вып. 5, стр. 321—333.
345. Однополые гиперболоиды и обобщение их понятия на примере системы коноприм. — *Зап. Горн. инст.*, 1912, т. III, вып. 5, стр. 334—336.
346. Еще о замечательных свойствах особой циклиды. — *Зап. Горн. инст.*, 1912, т. III, вып. 5, стр. 337—339.

347. Из результатов поездки в Богословский округ летом 1911 г. — Зап. Горн. инст., 1912, т. III, вып. 5, стр. 340—348.
348. Основные черты новой геометрии. (Вступительная лекция в курс новой геометрии, читанный в 1912 году). — Зап. Горн. инст., 1912, т. III, вып. 5, стр. 383—393.
349. Осевая коллинеация. — Зап. Горн. инст., 1912, т. III, вып. 5, стр. 394—396.
350. Вероятная тождественность двух веществ [$C_{18}H_{20}O_2$ и $C_{18}H_{22}O_2$], описанных как два различные. — Зап. Горн. инст., 1912, т. III, вып. 5, стр. 397.
351. Всегда ли можно привести в перспективное положение две линейные секунды (в пределах одной линейной терции)? — Зап. Горн. инст., 1912, т. III, вып. 5, стр. 397—398.
352. Нулевая система как полярная в линейной приме коносекунд. — Зап. Горн. инст., 1912, т. IV, вып. 1, стр. 63—64.
353. Новый случай вероятной тождественности двух веществ, описанных как два различные. — Зап. Горн. инст., 1912, т. IV, вып. 1, стр. 65.
354. Вывод формулы для вычисления граней исходного пояса по системе зональных вычислений. — Зап. Горн. инст., 1912, т. IV, вып. 1, стр. 65—66.
355. К характеристике личности П. Ф. Лесгафта. — Памяти Петра Францевича Лесгафта. Под ред. Совета С.-Петерб. биол. лаборатории П. Ф. Лесгафта. СПб., 1912, стр. 198—200.
356. Практика кристаллохимического анализа и составление таблиц для него (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1912, т. L, тетр. 6, стр. 513—575, 1 л. табл.

1913

357. Гиперболическая система. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 2, стр. 144—148.
358. Более точное осуществление преобразования плоскости гномостереографической проекции. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 2, стр. 151.
359. Простой и быстрый способ демонстрирования общего закона кристаллизации. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 3, стр. 241.
360. Дополнительное замечание к статье А. К. Болдырева «Одно из свойств касающихся окружностей». К свойствам сфероприм векториальных кругов. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 4, стр. 296—297.
361. Конофокальные совокупности. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 4, стр. 298—312.
362. Кристаллы кубической сингонии. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 4, стр. 312—320.

363. Построение ребер по символам в кристаллах гипогексагонального типа. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 4, стр. 321.
364. О проектирующих конусах стереографической проекции. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 4, стр. 322—323.
365. Еще о специальных кругах и шарах. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 4, стр. 323—324.
366. Простейший ход операций кристаллографического исследования. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 325—344 с фиг., 5 л. табл.
367. Концентрическая укладка симметрических совокупностей равных шаров. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 345—347.
368. Некоторые элементарно-геометрические теоремы и задачи, находящиеся в связи с совокупностями мнимых кругов и шаров. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 348—350.
369. Разряды конусов и простой способ распознавания этих разрядов. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 351—365, 1 л. табл.
370. Диаграмма плоских коноприм. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 366—367.
371. Диаграмма коносекунд. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 368—372, 1 л. табл.
372. Основные формулы сферической и плоской тетрагонометрии. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 373—390.
373. Вычисление чисел символа комплекса. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 391—396 с фиг.
374. Практическое решение задачи проведения линейной примы коноприм по двум данным. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 397—393.
375. О мнимых конопримах и коносекундах. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 399—402.
376. Система векториальных кругов тождественна с системой сфероприм лучей. — Зап. Горн. инст., 1913, т. IV, вып. 5, стр. 403.
377. Отзыв профессора Е. С. Федорова об относительном достоинстве трудов М. А. Усова и И. Н. Танатара, представленных на конкурсе по кафедре прикладной геологии в Екатеринославском горном институте. — Изв. Екатеринославск. горн. инст., 1913, вып. 2, стр. 1—6.
378. Новогодний гост. Ответ на анкету журнала «Огонек». — «Огонек», 1913, № 1, стр. 15.
379. Химические аналогии для веществ, приближающихся по кристаллической форме к сульфату калия (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1913, т. LII, тетр. 1, стр. 11—21.

380. Химическая молекула и кристаллическая молекула (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1913, т. LII, тетр. 1, стр. 22—43.
381. Первые результаты испытания таблиц для кристаллохимического анализа (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1913, т. LII, тетр. 2, стр. 97—136.
382. Построение ребер по их индексам в комплексах гипогексагонального типа (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1913, т. LIII, тетр. 2, стр. 178—179.
383. Проектирующие конусы стереографических проекций (нем.). — *Zeitschr. f. Krist. u. Min.*, 1913, т. LIII, тетр. 2, стр. 179—181.

1914

384. Коллинеарное преобразование мнимых пар лучей. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 1—2.
385. Сферические совокупности коноприм. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 3—5.
386. Симметрические гексапримы. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 6—8.
387. Системы отрезков и пар лучей на плоскости. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 9—16.
388. Теорема, относящаяся к системе кругов. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 17—18.
389. Системы векторов и векториальных пар лучей. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 19—21.
390. Новая интерпретация лучей. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 22—24.
391. Системы кругов на сфере. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 25—29.
392. Линейные совокупности векторов в пространстве. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 30—33.
393. Первое констатирование опытным путем асимморфной правильной системы. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 54—56 с фиг.
394. О строении кристаллов алмаза по Брэггу. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 68 с фиг.
395. Новые кристаллографические проекции. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 69—71 с фиг.
396. Определение плотностей сеток моноклинных гипогексагональных и тригоналоидных комплексов без помощи сдвигов. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 71—72.
397. Элементарный вывод формулы для определения плотности граней и ребер гипогексагонально-изотропного комплекса. — *Зап. Горн. инст.*, 1914, т. V, вып. 1, стр. 72—73.

398. Полярные отношения мнимых треугольников и четырехгранников. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 1, стр. 73—75.
399. Теорема Паскаля и ее ближайшие аналоги на плоскости и в пространстве. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 1, стр. 75—76.
400. Гексасекунда, пентаприма и пентасекунда плоскостей. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 1, стр. 76.
401. Полярные отношения вещественных треугольников и четырехгранников. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 174—181.
402. Главные совокупности в системах точек и плоскостей. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 182—186.
403. Дополнение вывода главных совокупностей вплоть до октоприм и коносекунд. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 187—192.
404. Новые особые точки треугольников в связи с гномоническими проекциями кристаллографических комплексов. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 193—194.
405. Линейчатая поверхность IV порядка с высокой симметрией и кривая с четырьмя точками возврата. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 195—197.
406. Квадратичные примы лучей. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 198—204.
407. Линейчатая поверхность IV порядка как гексаприма лучей. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 205—206.
408. Квадратичные терции и секунды лучей. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 207—209.
409. Наглядное изображение химического состава пород из области Христиании и лав Кавказа. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 210—223 с фиг.
410. Важная формула Миллера. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 233.
411. Анализ кристаллов, выделившихся из сливных вод лаборатории. — Зап. Горн. инст., 1914, т. V, вып. 2—3, стр. 234.
412. Кристаллохимический анализ на примерах. — Новые идеи в химии. Сборник 5-й. СПб., 1914, стр. 1—128.
413. Начало применения кристаллохимического анализа. — Новые идеи в химии. Сборник 5-й. СПб., 1914, стр. 129—150.
414. Кристаллическая структура. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1914, т. XXV, стр. 586—592 с фиг.
415. Кристаллография. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1914, т. XXV, стр. 593—616.
416. Кристаллы. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1914, т. XXV, стр. 616—621.

417. Кристаллографические измерения. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1914, т. XXV, стр. 1—4 (прил.).
418. Кристаллохимический анализ. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1914, т. XXV, стр. 4—6 (прил.).
419. Кристаллографические проекции. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1914, т. XXV, стр. 6—12 (прил.).
420. Новые кристаллохимические выводы в применении к таблицам для кристаллохимического анализа (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIII, тетр. 4, стр. 337—338.
421. Простейший ход кристаллографического описания (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 1, стр. 17—45 с фиг., 5 л. табл.
422. Стереографическая сетка как диаграмма конуса (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 1, стр. 46—52, 1 л. табл.
423. Новые кристаллографические проекции (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 1, стр. 53—58.
424. Первое констатирование опытным путем асимморфной правильной системы (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 163—165.
425. Автореферат работы: Вывод одной из основных формул учения о симметрии (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 1, стр. 110—111.
426. Автореферат работы: Опыты, наглядно демонстрирующие значительное различие в растворимости разных граней (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 1, стр. 112.
427. Автореферат работы: Усовершенствование критерия правильной установки кристаллов (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 170.
428. Автореферат работы: Изображение структуры кристалла векториальными кругами (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 171.
429. Автореферат работы: Заметка об одном свойстве стереографической проекции (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 171—172.
430. Автореферат работы: Опыты по кристаллизации между двумя сферами (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 173—174.
431. Автореферат работы: Сдвиг обыкновенных и полярных решеток (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 174.
432. Автореферат работы: Несколько формул, относящихся к системе зональных вычислений (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 175.

433. *Автореферат работы*: Выражение двойного преобразования символов (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 175—176.
434. *Реферат*: В. В. Никитин. Некоторые новые приборы и методы для оптических исследований по универсальному методу (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 1, стр. 110.
435. *Реферат*: Д. Н. Артемьев. О росте кристаллов, обточенных в форме шаров (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 1, стр. 111.
436. *Реферат*: Д. Н. Артемьев. Некоторые опыты с кристаллами, обточенными в форме шаров (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 170.
437. *Реферат*: В. В. Никитин. Определение величины двупреломления (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 172—173.
438. *Реферат*: Д. Н. Артемьев. Кристаллизация шара $K_2Cr_2O_7$ (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 174.
439. *Реферат*: Д. Н. Артемьев. Метод вычисления простейшего символа грани с определенной точностью (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 174—175.
440. *Реферат*: В. И. Соколов и Д. Н. Артемьев. Непосредственное определение плотностей сеток кристаллических граней (нем.). — Zeitschr. f. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 175.
441. *Реферат*: Д. Н. Артемьев. Вычисление сферических координат кристаллических граней после сдвига (нем.). — Zeitschr. Krist. u. Min., 1914, т. LIV, тетр. 2, стр. 175.

1915

442. Практикум по основным отделам кристаллографии. (С одной диаграммой на стереографической сетке). Пгр., 1915, 19 стр., 1 л. черт.
443. Теория осевых коллинеаций как расширение теории Штейнера коноприм. — Зап. Горн. инст., 1915, т. V, вып. 3—4, стр. 388—394.
444. Из задач, относящихся к линейчатым поверхностям 3-го порядка. — Зап. Горн. инст., 1915, т. V, вып. 4—5, стр. 395.
445. Родственность секунды парабол лучей с двумя постоянными лучами и системы лучей на плоскости. — Зап. Горн. инст., 1915, т. V, вып. 4—5, стр. 395.
446. Простой способ построения коррелятивных элементов в родственных секундах точек, коноприм точек и коноприм лучей с тремя постоянными элементами. — Зап. Горн. инст., 1915, т. V, вып. 4—5, стр. 396—397.

447. Расширение построения предыдущей заметки на конопримы с двумя или одним постоянным элементом. — Зап. Горн. инст., 1915, т. V, вып. 4—5, стр. 397—398.
448. Циклы коллинеации и линейные примы коноприм и коносекунд. — Зап. Горн. инст., 1915, т. V, вып. 4—5, стр. 398—400.
449. О результатах рассмотрения полного списка наблюдаемых до сих пор кристаллов кубической сингонии (в количестве около 515). — Зап. С.-Петербур. минер. общ., 2-я серия, 1915, ч. 50, стр. 21—22.
450. Первые шаги в деле распознавания расположения атомов в кристаллах. — Природа, 1915, № 3, стр. 339—350 с фиг.
451. Разум и инстинкт. — Природа, 1915, № 7—8, стр. 895—906 с фиг.
452. Процесс кристаллизации. — Природа, 1915, № 12, стр. 1471—1480.
453. Минералогия. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1915, т. XXVIII, стр. 676—704.

1916

454. Теорема, аналогичная теореме Паскаля, но относящаяся к пространству. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 54—59.
455. Некоторые следствия из теоремы, аналогичной теореме Паскаля. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 59—62.
456. Формула Сезаро и полярно-зоноэдрическая. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 63.
457. Клиновые микроскопические препараты простейшего устройства. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 64.
458. Тройственность установки тригоналоидных кристаллов. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 65.
459. Новый пример особого структурного изоморфизма. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 65—66.
460. Символ плоскости, проходящей через три атома. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 66—67.
461. Важный шаг научной петрографии. (По поводу книги: B. Owen e n. «The later stages of the evolution of the igneous rocks»). — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 67—71.
462. Критерий правильного построения основного параллелоэдра кристалла по экспериментальным данным. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 71—72 с фиг.
463. К вопросу об уралитизации. — Зап. Горн. инст., 1916, т. VI, вып. 1, стр. 72—74 с фиг.
464. Результаты первой стадии экспериментального исследования структуры кристаллов. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1916, т. X, ч. 1, № 5, стр. 359—389.

465. Основной закон кристаллохимии. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1916, т. X, ч. 1, № 6, стр. 435—454.
466. Химическая сторона кристаллического строения. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1916, т. X, ч. 1, № 7, стр. 547—553.
467. Системы планигонов как типических изоэдров на плоскости. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1916, т. X, ч. 2, № 16, стр. 1523—1534 со схем.
468. К вопросу об определении плотности расположения атомов в гранях кристаллов. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1916, т. X, ч. 2, № 17, стр. 1675—1688.
469. Строение вещества и закон Ньютона. — Природа, 1916, № 7—8, стр. 779—787.
470. Симметрия. — Энцикл. словарь бр. Гранат, 7-е изд., 1916, т. XXXVIII, стр. 601—622 с фиг.

1917

471. Правильная тройственная периодичность объемов параллелоэдров. — Зап. Горн. инст., 1917, т. VI, вып. 2, стр. 160.
472. Основные и фундаментальные параллелоэдры кристаллических веществ. — Зап. Горн. инст., 1917, т. VI, вып. 2, стр. 161.
473. Предусматривание кристаллизации по расположению атомов. Зап. Горн. инст., 1917, т. VI, вып. 2, стр. 161—163.
474. Новая концепция видов структуры кристаллов и кристаллохимический анализ. — Зап. Горн. инст., 1917, т. VI, вып. 2, стр. 163—164.
475. Нафталин из Куккерских сланцев Финского побережья. — Зап. Горн. инст., 1917, т. VI, вып. 2, стр. 164.
476. Еще теоремы о соотношениях между линейною и стереографическою проекциями. — Зап. Горн. инст., 1917, т. VI, вып. 2, стр. 164.
477. Новая начертательная геометрия. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1917, т. XI, ч. 1, № 10, стр. 657—686, 3 л. табл.
478. Применение начал новой геометрии к кристаллооптике. Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1917, т. XI, ч. 2, № 14, стр. 1141—1166 со схем., 1 л. табл.
479. Федоров Евграф Степанович. Краткая автобиография. — Материалы для Биограф. словаря действ. членов Акад. наук. Ч. II, Пгр., 1917, стр. 205—215.
480. Природа и человек. — Природа, 1917, № 4, стр. 423—432.
481. Числовые соотношения между зонами и гранями многогранников (англ.). — Mineralog. Magazine, 1917, т. XVIII, № 84, стр. 99—100.

482. Графические операции с четырьмя независимыми переменными. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 1, № 7, стр. 615—624 со схем.
483. Приложение графических операций с тремя независимыми переменными к составу слюд. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 1, № 7, стр. 625—630.
484. Химический тетраэдр в петрографии. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 1, № 7, стр. 631—644.
485. Группа хлорита в отношении химического состава. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 1, № 7, стр. 645—650.
486. Об основных минералах группы турмалина и о символах систем четвертой ступени. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 2, № 17, стр. 1891—1904.
487. Треугольники, четырехгранники и пентатопы как образы, обуславливающие коррелятивность, выражаемую одинаковыми символами. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 2, № 17, стр. 1905—1910.
488. Специальный упрощенный вид системы с параметром точкою. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 2, № 17, стр. 1911—1912.
489. Необычные полярные системы в плоскости. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1918, т. XII, ч. 2, № 17, стр. 1913—1924.

1919

490. Наглядный способ вывода формул простейшей системы кристаллографических вычислений. — Изв. Акад. наук, 6-я серия, 1919 т. XIII, ч. 2, № 16—18, стр. 991—1004 с фиг.
491. Основные черты кристаллохимического анализа. — Изв. Петрогр. научн. инст. им. П. Ф. Лесгафта, 1919, т. I, стр. 1—17.
492. Относительная роль труда добывания сырого материала и добавочного специализированного труда в науке. — Природа, 1919, № 4—6, стр. 243—252.

1920

493. Царство кристаллов. Таблицы для кристаллохимического анализа. При участии Д. Артемьева, Т. Баркера, Б. Орелкина и В. Соколова. С атласом (нем.). — Зап. Акад. наук по Физ.-мат. отд., 1920, т. XXXVI; текст LXXIV, 1050 стр., атлас 213 л. табл.

1949

494. Симметрия и структура кристаллов. Основные работы. Редакция чл.-корр. АН СССР А. В. Шубникова и проф. И. И. Шафрановского. М., 1949, 630 стр., 10 л. табл., 4 л. портр. (Акад. наук СССР. Классики науки).

495. Из переписки Е. С. Федорова с А. Шенфлисом. (Публикация Г. Б. Бокия и И. И. Шафрановского). — Научное наследство, т. II, М., 1951, стр. 314—340 с факс. (Акад. наук СССР. Институт истории естествозн.).
496. Из переписки Е. С. Федорова с Ю. В. Вульфом. (Публикация Г. Б. Бокия и И. И. Шафрановского). — Научное наследство, т. II, М., 1951, стр. 349—354. (Акад. наук СССР. Институт истории естествозн.).

497. Начала учения о фигурах. Редакция и примечания проф. О. М. Аншелеса, проф. И. И. Шафрановского и старш. научн. сотрудника В. А. Франк-Каменецкого. Л., 1953, 409 стр. с фиг., 1 л. табл. (Акад. наук СССР. Классики науки).
498. Новый метод оптического исследования кристаллических пластинок в параллельном свете. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 16—19 с фиг.
499. Сообщение Е. С. Федорова о компараторе Мишель-Леви и об универсальном столике. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 20—21.
500. Сообщение Е. С. Федорова о наблюдениях при параллельных николях, о важнейших определениях, совершаемых при помощи универсального столика, и об оптических константах аноморфита. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 22—23.
501. Теодолитный метод в минералогии и петрографии. Часть 2-я. Кристаллооптические исследования. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 24—61 с фиг.
502. Простейшая форма универсального столика. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 62—63.
503. Разрезы плагиоклазов, перпендикулярные к оптическим осям. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 64—65 с фиг.
504. Универсальный метод и изучение полевых шпатов. Ч. 1—3. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 66—190 с фиг., 1 л. табл.
505. Установление оптических аномалий в плагиоклазах. Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 191—193.
506. Микроскопическое определение периклинового закона. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 249—252.
507. Крайний случай зональности плагиоклазов. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 253—258.

508. Оптические исследования на универсальном столике. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 270—282 с фиг.
509. Новые приспособления к поляризационному микроскопу. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 283—287 с фиг.
510. Виды дисперсии оптических осей и определение их. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 288—294 с фиг.
511. О применении треножного циркуля в кристаллографии. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 295—298 с фиг.
512. Об определении по универсальному методу всех трех показателей преломления в минералах петрографических препаратов. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 299—301.
513. Последние шаги в деле универсально-оптических исследований. Применение к полевым шпатам. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 302—322 с фиг.
514. Определение показателей преломления в тонких шлифах. — Универсальный столик Е. С. Федорова. М., 1953, стр. 323—352 с фиг.

1955

515. Введение к таблицам для кристаллохимического анализа «Царство кристаллов». — Кристаллография, вып. 3. Сб. статей, посвящ. 100-летию со дня рождения акад. Е. С. Федорова. Л., 1955, стр. 5—80.
516. Попытка подвести атомные веса под один закон. (Публикация С. А. Щукарева и Р. Б. Добротина). Кристаллография, вып. 3. Л., 1955, стр. 85—96.
517. Письма Е. С. Федорова к И. В. Мухкетову. (Публикация и примечания Н. Н. Бархатовой и К. И. Шафрановского). — Кристаллография, вып. 3. Л., 1955, стр. 171—193.
518. Переписка Е. С. Федорова с П. Гротом. (Публикация и примечания И. И. Шафрановского). — Кристаллография, вып. 3, Л., 1955, стр. 195—226.
519. Новогодний тост. Ответ на анкету журнала «Огонек», 1913, № 1, стр. 15. (Публикация и примечания М. П. Шаскольской). — Кристаллография, вып. 3, Л., 1955, стр. 251.
520. О радиоляриеvidном образовании в гнейсе. — И. И. Шафрановский и Н. М. Раскин. Рукописные материалы Е. С. Федорова в Архиве Академии наук СССР. Тр. Архива, вып. 14, Изд. АН СССР, 1957, стр. 103.
521. Правильные системы точек и структуры уже исследованных кристаллов. — И. И. Шафрановский и Н. М. Ра-

скин. Рукописные материалы Е. С. Федорова в Архиве Академии наук СССР. Тр. Архива, вып. 14, Изд. АН СССР, 1957, стр. 104—136.

522. Письма Е. С. Федорова к П. Гроту, Ф. Клейну, Н. С. Курнакову, Н. А. Морозову, А. Шенфлису, Ш. Эрмиту. — И. И. Шафрановский и Н. М. Раскин. Рукописные материалы Е. С. Федорова в Архиве Академии наук СССР. Тр. Архива, вып. 14, Изд. АН СССР, 1957, стр. 136—143.



ЛИТЕРАТУРА О ЖИЗНИ И ТВОРЧЕСТВЕ
Е. С. ФЕДОРОВА

1. Алявдин В. Ф. и К. И. Шафрановский. Евграф Степанович Федоров. (К 20-летию со дня смерти). Природа, 1939, № 9, стр. 111—118.
2. Аншелес О. М. Сущность кристаллохимического анализа Федорова. Труды III Менделеевского съезда. Журн. Русск. физ.-хим. общ., т. 54, вып. 8, отд. 2, 1923, стр. 91—103.
3. Аншелес О. М. 100-летие со дня рождения великого русского ученого Е. С. Федорова. Вестн. Ленингр. гос. унив., № 1, 1954а, стр. 223—226.
4. Аншелес О. М. Творческое наследие Е. С. Федорова. Уч. зап. Ленингр. гос. унив., сер. геол. наук, вып. 4, 1954б, стр. 3—7.
5. Аншелес О. М. Федоров и современная кристаллография. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., т. 10, 1956, стр. 13—18.
6. Аншелес О. М. и И. И. Шафрановский. Евграф Степанович Федоров. Уч. зап. Ленингр. гос. унив., сер. геол.-почв. наук, вып. 83, 1940, стр. 1—15.
7. Белов Н. В. Великий русский кристаллограф и его детище. В кн.: Е. С. Федоров. Основные работы по симметрии и структуре кристаллов. Изд. АН СССР, 1949 (сер. «Классики науки»), стр. 580—586.
8. Белов Н. В. Классный метод вывода пространственных групп симметрии. Тр. Инст. кристаллографии АН СССР, вып. 6, 1951, стр. 25—62.
9. Белов Н. В. Е. С. Федоров (к 40-летию со дня смерти). Федоровская сессия по кристаллографии. Ленинград, 21—27 мая 1959 г. Тезисы докладов. Изд. АН СССР, 1959, стр. 5—8.
10. Белов Н. В. 75 лет учения о пространственных группах симметрии. Зап. Всесоюз. минералог. общ., ч. 91, вып. 1, 1962а, стр. 5—13.
11. Белов Н. В. 14 решеток Браве и 230 пространственных групп симметрии. Изд. АН СССР, М.—Л., 1962б.
12. Белов Н. В. и И. И. Шафрановский. Роль Е. С. Федорова в предыстории рентгеноструктурной кристаллографии. (К 50-летию открытия дифракции рентгеновских лучей в кристаллах). Зап. Всесоюз. минералог. общ., ч. 91, 1962, вып. 4.
13. Богомоллов С. А. Вывод правильных систем по методу Федорова. Ч. I, Л., 1932, 100 стр.; ч. II, Л., 1934, 191 стр.

14. Боккий Г. Б. Академик Е. С. Федоров — основоположник современной кристаллографии. Изд. «Знание», М., 1952.

15. Боккий Г. Б. Е. С. Федоров и кристаллохимия. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., т. 10, 1956а, стр. 19—27.

16. Боккий Г. Б. О законе расположения атомов в кристаллах. Сб. «Кристаллография», вып. 5, Изд. Ленингр. горн. инст., 1956б, стр. 25—36.

17. Боккий Г. Б. и И. И. Шафрановский. Русские кристаллографы. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., т. 1, 1947, стр. 87—120.

18. Боккий Г. Б. и И. И. Шафрановский. История вывода 230 пространственных групп. В кн.: Е. С. Федоров. Основные работы по симметрии и структуре кристаллов. Изд. АН СССР, 1949 (сер. «Классики науки»), стр. 587—598.

19. Боккий Г. Б. и И. И. Шафрановский. Материалы по истории русской кристаллографии. (Из архива Е. С. Федорова). Научное наследство, т. II, Изд. АН СССР, 1950, стр. 295—354.

20. Болдырев А. К. Е. С. Федоров (некролог). Геолог. вестн., 1921, т. IV (1918—1921), стр. 203—204.

21. Болдырев А. К. Схема научных работ Е. С. Федорова. Существенные черты его работ по геометрии и геометрической кристаллографии. Изв. Географ. инст., 1921, вып. 2, стр. 123—133.

22. Болдырев А. К. Комментарии к работе Е. С. Федорова «Das Kristallreich». Изд. АН СССР, Л., 1926, стр. 4—72.

23. Болдырев А. К. Евграф Степанович Федоров. Газ. «За индустриализацию», № 176, 4 VIII 1937.

24. Бух Н. К. Воспоминания. Л., 1928, стр. 145, 151, 152, 155, 156.

25. Бух Н. К. Подпольный революционер — великий ученый. Каторга и ссылка, 8 (71), 1931, стр. 194—195.

26. Вернадский В. И. Задачи минералогии в нашей стране (1917—1927). Природа, 1928, № 1, стб. 22—39.

27. Вертушков Г. Н. Выдающийся кристаллограф Е. С. Федоров. Тр. Горно-геолог. инст., вып. 26, Минералог. сб., № 3 (сборник посвящен памяти акад. Е. С. Федорова), Свердловск, 1955, стр. 12—17.

28. Григорьев Д. П. Заседание Всероссийского минералогического общества, посвященное памяти Е. С. Федорова 21 мая 1939 г. (к 20-летию со дня смерти). Зап. Всеросс. минералог. общ., ч. 68, вып. 2, 1939, стр. 504—505.

29. Григорьев Д. П. и И. И. Шафрановский. Выдающиеся русские минералоги. Изд. АН СССР, 1949, стр. 136—161.

30. Делоне Б. Н. Е. С. Федоров как геометр. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., т. 10, 1956, стр. 5—12.

31. Елисеев Н. А. К пятидесятилетию универсального метода Е. С. Федорова. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., т. 10, 1956, стр. 66—84.

32. Заварицкий А. Н. Введение в петрохимию. Изд. АН СССР, 1944, стр. 110—112.

33. З а в а р и ц к и й А. Н. Одна из важных задач минералогии (об изображении атомных структур минералов). Зап. Минералог. общ., т. 78, вып. 3, 1949а, стр. 141—165.
34. З а в а р и ц к и й А. Н. Об изображении атомных структур минералов. Изв. АН СССР, 1949б, № 6, стр. 141—165.
35. З а в а р и ц к и й А. Н. Развитие универсального метода Федорова и применение его к изучению полевых шпатов. Сб. «Универсальный столик Е. С. Федорова». Изд. АН СССР, 1953а, стр. 5—15.
36. З а в а р и ц к и й А. Н. Дальнейший шаг в применении универсального столика. (К пятидесятилетию федоровского метода). Сб. «Универсальный столик Е. С. Федорова», Изд. АН СССР, 1953б, стр. 763—778.
37. З а в а р и ц к и й В. А. О возможном усовершенствовании универсального столика Федорова. Сб. «Универсальный столик Е. С. Федорова», Изд. АН СССР, 1953в, стр. 831—832.
38. К о в а н ь к о Г. Н. Из истории структурной кристаллографии. Зап. Всесоюзн. минералог. общ., ч. 87, вып. 6, 1958, стр. 675—676.
39. К о в а н ь к о Г. Н. Е. С. Федоров о преподавании минералогии в средних технических школах. Изв. высш. уч. зав., геология и разведка, 1959, № 2, стр. 146—151.
40. К р и с т а л л о г р а ф и я, вып. 3, сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения академика Е. С. Федорова, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, 256 стр.
41. К у з н е ц о в Е. А. К истории русской петрографии. Федоровский метод, его возникновение в России и развитие на родине и за границей. Уч. зап. Моск. гос. унив., вып. 104, М., 1946, стр. 98—103.
42. Л е в и н с о н - Л е с с и н г Ф. Ю. Несколько юбилейных дат в петрографии [в том числе «Сорокапятилетие так называемого универсального, или федоровского, метода в петрографии»]. Природа, 1938, № 6, стб. 137—144.
43. Л о д о ч н и к о в В. Н. Несколько замечаний по поводу применения микроскопического метода Е. С. Федорова. Сб. «Универсальный столик Федорова», Изд. АН СССР, 1953, стр. 743—751.
44. М и х е е в В. И. и И. И. Ш а ф р а н о в с к и й. Достоверность определения типа структуры по методу Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография» (тр. Федоровской научной сессии 1949 г.), Металлургиздат, 1951, стр. 5—14.
45. М и х е е в В. И. и И. И. Ш а ф р а н о в с к и й. Кристаллографические законы, открытые и сформулированные Е. С. Федоровым. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 97—112.
46. Н и к и т и н В. В. Универсальный метод Федорова, тт. I, II, III. Пгр., 1911—1915, 499 стр.
47. Н и к и т и н В. В. Евграф Степанович Федоров. Изв. Геол. ком., т. 38, 1919, № 4—7, стр. 429—467 (со списком трудов).
48. Н и к и т и н В. В. Евграф Степанович Федоров. Изв. Географ. инст., 1921, вып. 2, стр. 113—122.
49. Н и к и т и н В. В. Новые диаграммы для определения полевых шпатов универсальным методом Федорова. Сб. «Уни-

версальный столик Федорова», Изд. АН СССР, 1953, стр. 567—651.

50. Николаев В. А. Некоторые дополнения к теории и практике универсального метода. Сб. «Универсальный столик Федорова», Изд. АН СССР, 1953, стр. 553—566.

51. Определитель кристаллов, т. I. Изд. Ленингр. горн. инст., 1937—1939, стр. 438—857.

52. Орелкин Б. П. и Г. В. Пигулевский. Применение кристаллохимического метода Е. С. Федорова в научной и практической работе. Новые идеи в химии, сб. 5, Пгр., 1914, стр. 151—160.

53. Подногин А. К. Микроскопическое исследование порообразующих минералов по методу Федорова. Госгеолиздат, М., 1935, 108 стр.

54. Раскин Н. М. и И. И. Шафрановский. Рукописное наследие Е. С. Федорова. Вестн. АН СССР, № 1, 1956, стр. 71—77.

55. Раскин Н. М. и И. И. Шафрановский. Е. С. Федоров и В. И. Вернадский по материалам архива Академии наук СССР. Сб. «Очерки по истории геологических знаний», № 8, М., 1959, стр. 165—176.

56. Романов Б. М. Роль Е. С. Федорова в истории геологического исследования Урала. (К столетию со дня рождения Е. С. Федорова). Тр. Горно-геолог. инст., вып. 26, Минералог. сб., № 3, Свердловск, 1955, стр. 5—11.

57. Саранчина Г. М. Федоровский метод. Изд. Ленингр. гос. унив., 1954, 132 стр.

58. Седых Т. Б. Е. С. Федоров — борец за материализм. Вопросы философии, 1954, № 3, стр. 151—158.

59. Смирнов В. И. Деятельность Е. С. Федорова в области геологии рудных месторождений. Сб. «Очерки по истории геологических знаний», вып. 5, 1956, стр. 239—247.

60. Соболев В. С. Федоровский метод. М., Госгеолтехиздат, 1954, стр. 264.

61. Соболев В. С. О роли Е. С. Федорова в развитии современной петрографии. Зап. Минералог. общ., ч. 84, вып. 2, 1957, стр. 209—217.

62. Соколов Н. М. О мировоззрении Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография», вып. 5, Изд. Ленингр. горн. инст., 1956, стр. 5—23.

63. Соловьев С. П. Роль акад. Е. С. Федорова в развитии петрографии. Зап. Минералог. общ., т. 73, вып. 4, 1949, стр. 237—240.

64. Соловьев С. П. Петрографическое наследие Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст. 1955, стр. 147—156.

65. Стратонович Е. Определение плагиоклазов по новому способу Федорова. Зап. Минералог. общ., т. 37, 1899, 158 стр.

66. Стулов Н. Н. и И. И. Шафрановский. Новые материалы к творческой биографии Е. С. Федорова. Зап. Всесоюз. минералог. общ., ч. 88, вып. 5, 1959, стр. 578—582.

67. Труды Горно-геологического института, вып. 26, Минералог. сб., № 3. (Посвящается памяти академика Е. С. Федорова). Свердловск, 1955, 248 стр.

68. Труды Института истории естествознания и техники, т. 10, Материалы юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения Е. С. Федорова. Изд. АН СССР, 1956, стр. 1—84.

69. Универсальный столик Е. С. Федорова. Сб. под ред. А. Н. Заварицкого и др. Изд. АН СССР, М., 1953, 838 стр.

70. Усов М. А. Федоровский или универсально-оптический метод исследования порообразующих минералов. Томск, 1910, XVI, 142 стр.

71. Ученые записки Ленингр. гос. унив., сер. геол.-почв. наук, вып. 3. (Сборник посвящен 20-летию со дня смерти Е. С. Федорова), 1940.

72. Ученые записки Ленингр. гос. унив., № 178, сер. геол. наук, вып. 4, Кристаллография и кристаллохимия. (Сборник посвящен 100-летию со дня рождения Е. С. Федорова), Л., 1954, 264 стр.

73. Федоров Е. С. Энциклопедич. словарь Брокгауза и Ефрона, 64-й полутом, 1902, стр. 413.

74. Федоров Е. С. Материалы для биографического словаря действительных членов Академии наук, ч. II. Пгр., 1915, стр. 205—215. (Со списком трудов).

75. Ферсман А. Е. Памяти Евграфа Степановича Федорова. Природа, 1919, № 4/6, стб. 235—244.

76. Ферсман А. Е. Е. С. Федоров и его роль в науке. Наука и ее работники, 1920, № 1, стр. 13—15.

77. Франк-Каменецкий В. А. «Начала учения о фигурах» Е. С. Федорова и их значение для кристаллографии. В кн. «Е. С. Федоров. Начала учения о фигурах». Изд. АН СССР, 1953, стр. 371—390.

78. Франк-Каменецкий В. А. Монография Е. С. Федорова о фигурах и ее значение для кристаллографии. Уч. зап. Ленингр. гос. унив., № 178, сер. геолог. наук, вып. 4, 1954, стр. 8—22.

79. Франк-Каменецкий В. А. К истории создания теодолитного гониометра. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 139—146.

80. Франк-Каменецкий В. А. и И. И. Шафрановский. Начало творческого пути Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 113—124.

81. Хвасс Э. А. Работы Е. С. Федорова в области геометрии и применение их в горно-металлургической промышленности. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 157—168.

82. Шафрановский И. И. Евграф Степанович Федоров. Вестник знаний, 1939, № 12, стр. 62—65.

83. Шафрановский И. И. Е. С. Федоров — великий русский кристаллограф. Изд. «Сов. наука», М., 1945, 92 стр.

84. Шафрановский И. И. Гениальный русский кристаллограф, петрограф, минералог и геометр — академик Е. С. Федоров. Сб. «Выдающиеся ученые Горного института». Изд. Ленингр. горн. инст., Л., 1948а, стр. 33—46.

85. Шафрановский И. И. Евграф Степанович Федоров. Сб. «Люди русской науки», т. I, М.—Л., 19486, стр. 427—444.

86. Шафрановский И. И. Евграф Степанович Федоров. Жизнь и творчество. В кн.: «Е. С. Федоров. Основные работы по симметрии и структуре кристаллов». Изд. АН СССР, сер. «Классики науки», 1949а, стр. 557—579.

87. Шафрановский И. И. Евграф Степанович Федоров — великий русский кристаллограф, минералог, петрограф и геометр. Природа, 19496, № 4, стб. 61—65.

88. Шафрановский И. И. Е. С. Федоров. Изд. АН СССР. М.—Л., 1951. (Научно-популярная серия. Биографии), стр. 282.

89. Шафрановский И. И. Евграф Степанович Федоров. (К столетию со дня рождения). Зап. Всесоюзн. минералог. общ., ч. 82, вып. 4, 1953, стр. 241—246.

90. Шафрановский И. И. Курсы кристаллографии Е. С. Федорова. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955а, стр. 125—137.

91. Шафрановский И. И. Основатель современной кристаллографии. Природа, 19556, № 6, стб. 73—79.

92. Шафрановский И. И. Е. С. Федоров и Академия наук. Тр. Инст. истории естествозн. и техн., Изд. АН СССР, т. 10, 1956, стр. 28—65.

93. Шафрановский И. И. Федоров Евграф Степанович. Большая советская энциклопедия. Изд. 2, т. 44, стр. 574.

94. Шафрановский И. И. Возможность использования кристаллохимического анализа для решения минерагенетических задач. Зап. Всесоюзн. минералог. общ., ч. 89, вып. 1, 1960.

95. Шафрановский И. И. История кристаллографии в России. Изд. АН СССР, М.—Л., 1962.

96. Шафрановский И. И. Сб. «Люди русской науки», геология и география, Гос. изд. физ.-мат. лит., М., 1962, стр. 63—82.

97. Шафрановский И. И. и Г. Б. Бокий. Из истории русской кристаллографии. Научная публицистика Е. С. Федорова. Вестн. Моск. унив., 1952а, № 10, стр. 129—147.

98. Шафрановский И. И. и Г. Б. Бокий. Несколько забытых статей Е. С. Федорова. Зап. Всесоюзн. минералог. общ., ч. 81, вып. 3, 19526, стр. 193—198.

99. Шафрановский И. И. и Н. М. Раскин. Рукописные материалы Е. С. Федорова в Архиве Академии наук СССР. Вступительная статья, научное описание, тексты. Тр. Архива АН СССР, вып. 14, 1957, 212 стр.

100. Шафрановский И. И. и А. М. Соркин. К вопросу о полной библиографии трудов Е. С. Федорова. Зап. Всесоюзн. минералог. общ., ч. 85, № 2, 1956, стр. 247—250.

101. Шубников А. В. Евграф Степанович Федоров. Наука и жизнь, 1944, № 6, стр. 41—42.

102. Шубников А. В. Об основном законе кристаллографии Е. С. Федорова. (Материал к истории и психологии одной ошибки). Тр. Инст. кристаллографии АН СССР, вып. 11, 1955, стр. 18—32.

103. Шустерова М. С. Обзор документальных материалов Центрального государственного исторического архива

СССР в Ленинграде о Е. С. Федорове. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 253—255.

104. Щ е р б а к о в Д. И. Советская минералогия на службе народного хозяйства. К 10-летию со дня смерти А. Е. Ферсмана. Природа, 1955, № 5, стб. 27—36.

105. Ш у к а р е в С. А. и Р. Б. Д о б р о т и н. О новой рукописи Е. С. Федорова по периодическому закону. Сб. «Кристаллография», вып. 3, Изд. Ленингр. горн. инст., 1955, стр. 81—84.



О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	5
Детство и юность	8
Революционер-подпольщик и начинающий ученый	18
Из истории кристаллографии	28
Горный институт и Минералогическое общество	41
Первая книга — «Начала учения о фигурах»	50
Северный Урал и Геологический Комитет	77
Законы расположения атомов в кристаллах	94
Федоровский гониометр и федоровский универсальный столлик	112
Турьинские рудники. Кафедра геологии в Московском сельскохозяйственном институте	128
Е. С. Федоров и императорская Академия наук	143
Директор и профессор Горного института	154
«Царство кристаллов»	173
Новая геометрия	193
Триумф научного предвидения. Последние годы	204
Работы по кристаллографии, минералогии, петрографии и геологии	219
Основные черты творчества	237
Список печатных трудов Е. С. Федорова	242
Литература о жизни и творчестве Е. С. Федорова	277

Иларийон Иларионович Шафрановский

ЕВГРАФ СТЕПАНОВИЧ ФЕДОРОВ

Утверждено к печати

*Редколлекцией научно-биологической серии при Академии наук СССР
Редактор Издательства Е. А. Семенова. Художник М. Н. Свинкина
Технический редактор Р. А. Замаева. Корректор М. В. Евдокимова*

Сдано в набор 18/1 1963 г. Подписано к печати 15/V 1963 г. РИСО АН СССР
№ 13-2В. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бум. л. 4¹/₁₆. Печ. л. 8⁷/₈=14.52 усл.
печ. л. + 3 вкл. Уч.-изд. л. 14,8+3 вкл. (0,25). Изд. № 1898. Тип. зак. № 27
М-18347. Тираж 5500.

Цена 1 р. 11 к.

Ленинградское отделение Издательства Академии наук СССР
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

И. И. Шафрановский

ЕВГРАФ СТЕПАНОВИЧ
ФЕДОРОВ

ЕВГРАФ СТЕПАНОВИЧ ФЕДОРОВ

И. И. ШАФРАНОВСКИЙ



1P-11K.

ACADEMIC PRESS
ACADEMIC PRESS