

---

---

ИСТОРИЯ  
НАУКИ

---

---

РАЗВИТИЕ Е.С. ФЕДОРОВЫМ РОССИЙСКО-ГЕРМАНСКИХ  
НАУЧНЫХ СВЯЗЕЙ

© 2020 г. П. Пауфлер<sup>1, \*</sup>, д. чл. С. К. Филатов<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*Дрезденский технический университет, Дрезден, 01062 Германия*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб, 7/9, С.-Петербург, 199034 Россия*

\**e-mail: peter.paufler@tu-dresden.de*

\*\**e-mail: filatov.stanislav@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.05.2020 г.

После доработки 13.08.2020 г.

Принята к публикации 21.08.2020 г.

На заре развития рентгеноструктурного анализа тесные научные связи ученых из России и Германии, задокументированные, в частности, в “*Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*”, оказали существенное влияние на развитие наших нынешних представлений о кристаллическом состоянии вещества. Спустя сто лет после смерти Федорова, в настоящей работе описывается научное взаимодействие российского кристаллографа Е.С. Федорова и германских ученых А. Шёнфлиса и П. Грота, творческий обмен идеями которых способствовал развитию рентгеноструктурного анализа.

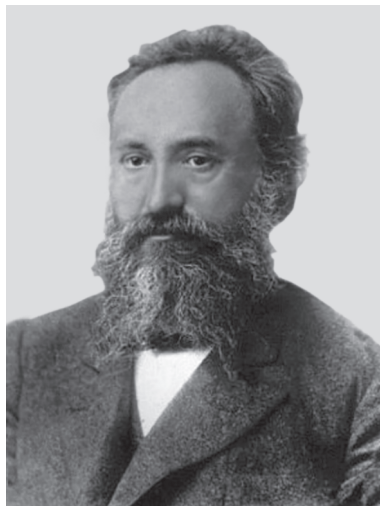
*Ключевые слова:* Е. С. Федоров, А. Шёнфлис, У. Барлоу, пространственные группы, российско-германское сотрудничество, *Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*

**DOI:** 10.31857/S0869605520050056

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Выдающийся российский кристаллограф Евграф Степанович Федоров (1853–1919) (рис. 1) заслужил международное признание за его многочисленные новаторские идеи в области кристаллографии, например (Бокий, Шафрановский, 1951; Shafranovskij, Belov, 1962; Burckhardt, 1967, 1971; Senechal, Galiulin, 1984; Scholz, 1989, Шафрановский и др., 1991; Фёдоров, 1999; Filatov, Urusov 2003; Галиулин, 2003; Kaemmel, 2004; Fritsch, 2007; Menailov, 2008; Kubbinga, 2012; Authier, 2013). Наиболее значимыми из них являются вывод 230 пространственных групп и теодолитные методы исследования оптических свойств и огранки кристаллов, названные впоследствии его именем.

По случаю 100-летия со дня его смерти мы кратко остановимся на одном из аспектов его деятельности, связывающем научные сообщества России и Германии. На рубеже 19-го и 20-го веков журнал “*Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*” (основан в 1877 году; сокращенно “*Z. Kryst*”) играл ведущую роль в области кристаллографии, и здесь обсуждаются 72 публикации Е.С. Федорова в этом журнале. Благодаря этим публикациям результаты работ Федорова стали известны во всем мире и особенно в немецкоязычных странах. Во второй половине 20-го века журнал *Z. Kryst.* перешел на английский язык (*Zeitschrift für Kristallographie—Crystalline Materials*). Появились и другие журналы, специализирующиеся в области кристаллографии, например, *Acta Crystallographica*, *Кристаллография*, *Crystal Research and Technology*. Философ-



**Рис. 1.** Евграф Степанович Федоров [[https://de.wikipedia.org/wiki/Jewgraf\\_Stepanowitsch\\_Fjodorow](https://de.wikipedia.org/wiki/Jewgraf_Stepanowitsch_Fjodorow)].

**Fig. 1.** Evgraf Stepanovich Fedorov.

ские работы Федорова (Галиулин, 2003; Meniaïlov, 2008) в данной статье не рассматриваются.

Важным фактором являлось также плодотворное взаимодействие между автором Евграфом Федоровым и главным редактором *Z. Kryst*. Паулем Гротом (Steinmetz et al., 1939), документально подтвержденное Шафрановским (Шафрановский и др., 1991). Обмен письмами происходил в период с 6/18 октября 1891 года по 5/18 июля 1914 года. П. Грот предоставил возможность Федорову публиковать результаты своих исследований, охватывающие широкий круг его интересов. Благодаря высокому уровню представленных статей Грот в свою очередь повышал рейтинг журнала. Настоящая работа структурирована по основным темам, рассмотренным Федоровым в *Z. Kryst*.

Прежде чем вдаваться в подробности достижений Федорова, мы хотим подчеркнуть тот знаменательный факт, что Федоров и его прямые потомки мужского пола образуют династию геологов четырех поколений: Евграф Степанович Федоров (1853–1919), Евграф Евграфович Федоров (1880–1965), Элий Евграфович Федоров (данные о рождении и смерти отсутствуют) и Вадим Эльевич Цубин (Федоров) (с 1940 г. по настоящее время). Мать Вадима Эльевича решила дать ему свою фамилию. По словам Вадима Эльевича (5 + 50 лет..., 2013), “геологическая линия” на нем прервалась, хотя есть еще два поколения потомков: его дети и внуки. Один из авторов статьи (С.К. Филатов) учился на геологическом факультете Ленинградского (Санкт-Петербургского) государственного университета в группе геохимиков с правнуком Федорова, Вадимом Цубиным. Вадим учился на кафедре петрографии (петрографами были его прадед и мать), а С.Ф. – на кафедре кристаллографии. Вадим гордился своим прадедом, однако, будучи весьма скромным, он не обсуждал с сокурсниками свою родословную, и друзья не знали о его гениальном прадеде вплоть до окончания учебы, пока Вадим не начал работать во ВСЕГЕИ (Всесоюзный геологический институт), где любознательные молодые коллеги разгадали тайну Вадима Федорова по его редкому отчеству. Еще через полвека узнали эту тайну и однокурсники, собравшиеся на встречу “5 + 50” [5 + 50 лет..., 2013]. Тогда же Вадим впервые посетил кафедру кристаллографии СПбГУ, где была сделана фотография (рис. 2).



**Рис. 2.** Вадим Эльевич Цубин (Федоров) (*справа*), правнук Евграфа Степановича Федорова, во время посещения кафедры кристаллографии СПбГУ в сопровождении своей жены Людмилы Васильевны через 50 лет после окончания учебы по случаю праздничного заседания кафедры. Он показывает портрет своего прадеда, нарисованный молодым художником – кристаллографом Романом Каюковым (Фото С.К. Филатова).

**Fig. 2.** Vadim Elievich Zubin (Fedorov) (*right*), great-grandson of Evgraf Stepanovich Fedorov, when he visited the Department of Crystallography of SPBU—accompanied by his wife Ljudmila Vasil’evna—50 years after finishing his studies on the occasion of a festive session of the Department. He shows the portrait of his great-grandfather, done by the young artist Roman Kajukov—student at the Department.

В то время как научная деятельность Е.С. Федорова будет описана в следующих разделах, кратко отметим особенности жизни ученых и атмосферу вокруг интеллигенции России конца 19-го и начала 20-го века. К счастью, оставила воспоминания жена Федорова, Людмила Васильевна Федорова, урожденная Панютина, выпускница Смольного института и талантливая писательница (Федорова, 1992) ставшая настоящей опорой для мужа в научной и повседневной жизни на фоне драматических событий российской истории. В семье Федоровых было трое детей (сын и две дочери).

## 2. О ПЛОДОТВОРНОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ Е.С. ФЕДОРОВА И А. ШЁНФЛИСА

Нет сомнений в том, что вывод групп симметрии для кристаллов (230 типов пространственных групп, или групп Федорова) остается важнейшим научным достижением Е.С. Федорова (рис. 3). 230 типов пространственных групп означают число комбинаций операций симметрии при условии трехмерной трансляционной симметрии. Типы пространственных групп обычно сокращают до “пространственных групп”. Однако, величина трансляции векторов должна учитываться при оценке общей симметрии. Термин “пространственная группа” включает в себя конкретные трансляции, а

## I.

## Симметрия правильных систем фигуръ.

Е. С. Федорова.

## ПРЕДИСЛОВІЕ.

Представленія о правильныхъ системахъ фигуръ столь же древни, какъ и гипотезы о строеніи кристалловъ; представленія эти всегда шли рука объ руку съ этими гипотезами, составляя какъ-бы двѣ стороны одного и того же предмета.

Точному геометрическому изученію фигуръ должно предшествовать изученію точекъ; поэтому, и въ этой области представленіе о правильныхъ системахъ фигуръ развилось въ точныя математическія понятія, когда вмѣсто нихъ Bravais <sup>1)</sup> задался правильными системами точекъ. Однако и здѣсь, какъ и въ ученіи о симметріи конечныхъ фигуръ, основатель теоретической кристаллографіи нѣсколько сгузилъ основное опредѣленіе, ограничившись лишь

<sup>1)</sup> Mémoire sur les systèmes formés par des points distribués régulièrement sur un plan, ou dans l'espace. Journ. de l'Ec. polytechn. 1850, t. 19. Также въ Etudes crystallographiques 1866.

Рис. 3. Первая страница публикации Е.С. Федорова “Симметрия правильных систем фигур”, появившейся в записках Императорского С.-Петербургского минералогического общества, 1891 (Федоров, 1891).

Fig. 3. First page of E.S. Fedorov's publication “Symmetry of regular systems of figures”, which appeared in Proc. Imp. St.-Petersburg Miner. Soc., 1891.

термин “тип пространственной группы” независим от них. История этого открытия — яркий пример того, как работает естествознание, что было отмечено рядом авторов (Бокий, Шафрановский, 1951; Shafranovskij, Belov, 1962; Burckhardt, 1967, 1971; Scholz, 1989, Шафрановский и др., 1991; Фёдоров, 1999; Filatov, Urusov 2003; Галиулин, 2003; Kaemmel, 2004; Fritsch, 2007; Meniaïlov, 2008; Kubbinga, 2012; Authier, 2013). Мы отдельно укажем роль немецкого математика Артура Шёнфлиса, который использовал теорию групп для развития классификации систем точек Зонке (1842–1897) (немецкий физик и кристаллограф из Карлсруэ, Йены и Мюнхена) (Sohncke, 1879) развитию Феликсом Клейном (1849–1925) (немецкий математик в Геттингенском университете), добавившему несобственные движения пространства (Schoenflies, 1887, 1888, 1888a, 1889, 1890). Подробнее о его жизненном пути см. (Kaemmel, 2004).

На очередном собрании Императорского С.-Петербургского минералогического общества 21 ноября 1889 г. (по Юлианскому календарю, или календарю в старом стиле) (Федоров, 1890) Федоров объявил о завершении своей работы “Симметрия правильных систем фигур”. Публикация изображена на рис. 3. Кроме того, он сообщил, что случайно узнал о публикации Шёнфлиса (Schoenflies, 1889), посвященной той же теме. Федоров отметил, что Шёнфлис перечислил 227 групп симметрии, т.е. на одну меньше, чем он. Шёнфлис, в свою очередь, впервые упомянул Федорова в (Schoenflies, 1890).

В конце 1890 г. Федоров представил краткое изложение своих работ по симметрии на немецком языке в “Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie” (Fedorow, 1891). Между 1889 и 1908 годами Шёнфлис и Федоров начали плодотворную переписку (Burckhardt, 1971, Scholz, 1989, Бокий, Шафрановский, 1951a), которая представляет собой часть того самого сотрудничества, о котором говорится в названии настоящего раздела.

В первом письме Федорову от 14 декабря 1889 года Шёнфлис направил свои работы, опубликованные в 1888 году (Schoenflies 1888, 1888a) со словами “Über die Übereinstimmung mit Ihren eigenen Anschauungen spreche ich meine große Freude aus ... Die Priorität gebe ich Ihnen gern zu...” (Burckhardt, 1971, с. 92) см. также (Authier, 2013, с. 394) (“Выражаю большую радость по поводу согласия с Вашими собственными представлениями... Охотно отдаю Вам приоритет...” *перевод с немецкого Ю.Л. Войтеховского*).

В 1892 г. Федоров, сопоставляя результаты, полученные им и Шёнфлисом, заключил: “...nachdem wir Beide die ersten Resultate dieser Thätigkeit publicirt haben, tritt eine höchst wunderbare Thatsache zu Tage: eine solche Uebereinstimmung in der Arbeit zweier Forscher, wie vielleicht die Geschichte der Wissenschaft kein anderes Beispiel aufzustellen vermöchte” (Fedorow, 1892, с. 26) (“... после того, как мы оба опубликовали первые результаты этой деятельности, выясняется в высшей степени удивительный факт – такое совпадение в работе двух исследователей, коего другого примера, быть может, история науки установить не в состоянии” *перевод с немецкого Ю.Л. Войтеховского*).

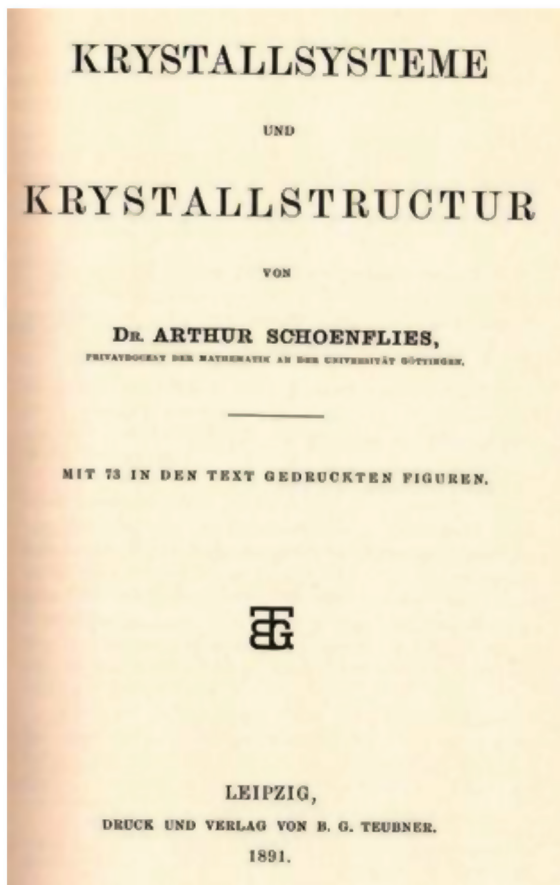
Кроме того, он подчеркнул взаимное влияние российских и германских научных работ, указав: “...das Wesentlichste, was den zweiten Abschnitt des neuen Buches von Schoenflies ausmacht (über 400 Seiten umfassend), sich als unsere gemeinsamen Resultate angeben lässt, welche zum grössten Theile bisher noch von keinem Forscher publicirt wurden” (“...самое существенное, что составляет второй раздел новой книги Шёнфлиса (объемом более 400 страниц) (см. (Schoenflies, 1891) и рис. 4), можно подавать как наши совместные результаты, которые большей частью до сих пор еще не были опубликованы ни одним исследователем”, *перевод с немецкого Ю.Л. Войтеховского*).

Шёнфлис высоко оценил это высказывание Федорова (Schoenflies, 1892), тем более, что нечто подобное он и сам собирался опубликовать. Кроме того, он указал и на несколько различий в определении терминов. Дружеские отношения между Федоровым и Шёнфлисом не мешали им и критиковать друг друга (см., например, Burckhardt, 1971; Федоров, 1890). Федоров обратил внимание на то, что Шёнфлис рассказывает о хронологии сделанных ими совместных открытий (Fedorow, 1891, с. 588). Дальнейшая переписка была посвящена некоторым математическим вопросам, в которых также участвовал Ф. Клейн (Burckhardt, 1971, Scholz, 1989, Fedorow, 1892]. Затем связь была прервана до 1903 г. (последнее письмо датировано 14 мая 1908 г. (Burckhardt, 1971).

### 3. ВКЛАД ЕВГРАФА ФОН ФЕДОРОВА И ПАУЛЯ ФОН ГРОТА В РАЗВИТИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИИ

#### 3.1. Е.С. Федоров как автор, рецензент и консультант

Первая статья Федорова в Z. Kryst. (Fedorow, 1892) была результатом более чем трехлетнего общения между ним и Шёнфлисом и содержала первый правильный список из 230 пространственных групп. Помимо главной особенности статьи – перехода от номенклатуры Федорова к номенклатуре Шёнфлиса, Зонке и Гесселя (Иоганн Фридрих Кристиан Гессель (1796–1872), немецкий кристаллограф, профессор в Марбурге), – были даны и выражения Федорова для описания симметрии посредством аналитической геометрии. Это оказалось эффективным для работы с операциями симметрии. Более поздние различные обозначения пространственных групп даны, например, в (Hilton, 1902; Nowacki, 1972; Paufler, 2019).



**Рис. 4.** Титульный лист книги А. Шёнфлиса “Сингонии и кристаллическая структура”, изданной Б.Г. Тойбнером, Лейпциг, 1891 (Schoenflies, 1891).

**Fig. 4.** Title page of A. Schoenflies’ book “Crystal Systems and Crystal Structure”, published by B.G. Teubner, Leipzig 1891.

С этого времени Евграф фон Федоров начал обширную переписку с основателем Z. Kryst. Паулем Генрихом Гротом (рис. 5) (Kraus, 1926; Steinmetz, Weber, 1939, Menzer, 1966; Faltheiner, 1973, 1985) (1843 г., Магдебург–1927 г., Мюнхен). Грот был профессором минералогии в Мюнхенском университете с 1883 по 1924 год и на рубеже веков ведущим немецким кристаллографом. Их взаимоотношения сохранялись в течение всего периода 1891–1914 годов до Первой мировой войны. И, нужно отметить, это был более чем деловой обмен письмами.

Федоров по-разному подписывал свои письма Гроту: до 1896 г. в основном “Е. Федоров”, 1896–1898 “Ев. Федоров”, 1898–1906 гг. “Е. фон Федоров”, 1906–1914 гг. “Е.С. Федоров”. Поскольку он являлся членом Баварской академии, имеется информация о некоторых его личных данных. В качестве своей профессии он указал профессию горного инженера и профессора Московского сельскохозяйственного института, а своего происхождения – из русской дворянской семьи (Шафрановский и др., 1991, с. 72), отсюда и дворянский префикс “фон”. Его отец был генерал-майором



Рис. 5. Пауль Генрих фон Грот ([https://de.wikipedia.org/wiki/Paul\\_Heinrich\\_von\\_Groth](https://de.wikipedia.org/wiki/Paul_Heinrich_von_Groth)).

Fig. 5. Paul Heinrich von Groth.

(Kaemmel, 2004). Е.С. Федоров был очень разочарован несостоятельностью русского дворянства во время революции 1905 года и указал в письме к Гроту от 15/28 ноября 1906 года, что формально отказался от социальной принадлежности к дворянству, то есть он перестал указывать префикс “фон” при подписании писем. Однако, публикации в *Z. Kryst.* продолжали появляться под авторством “Е. фон Федоров”.

Переписка довольно хорошо показывает реакцию обоих ученых на актуальные новые достижения и во многом способствовала взаимопониманию. Грот также сыграл и немаловажную роль в открытии Лауэ дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке (Kraus, 1926; Steinmetz, Weber, 1939, Menzer, 1966; Faltheiner, 1973, 1985).

Будучи членом-корреспондентом Российской академии наук в Санкт-Петербурге с 1883 года, а также Почетным иностранным членом Императорского минералогического общества с 1890 г., Грот был хорошо известен среди российских минералогов и знаком с Российским минералогическим обществом. Он также знал о неприятии Федорова в Академии. Гротом были высоко оценены научные достижения Федорова, вследствие чего вместе с Чермаком (Густав Чермак (1836 г., Литтау–1927 г., Вена), австрийский минералог) они выдвинули его на премию Санкт-Петербургского минералогического общества, которую Федоров получил 7 декабря 1893 г. (Шафрановский и др., 1991, с. 287) за разработанный теодолитный метод (Fedorow, 1893).

Более того, в том же году Грот выдвинул кандидатуру Федорова и для избрания в Академию, хотя и безуспешно (Шафрановский и др., 1991, с. 45). Решив обойти эти внутренние препятствия, он рекомендовал Е.С. Федорова вместе с Л. Зонке к избранию членами-корреспондентами Баварской академии наук в Мюнхене. Когда Федоров в знак признания его выдающихся научных достижений был награжден дипломом 19 ноября 1896 года, он получил и международное признание. В 1895 году он был назначен на должность профессора геологии. Федоров в письме к Гроту отметил, что формально в России он не является кристаллографом, потому, нуждаясь в рабочем

месте, работает (Шафрановский и др., 1991, с. 57) в Московском сельскохозяйственном институте. Он придавал особое значение тому факту, что его избрала именно германская Академия, поскольку считал, что в ней никогда не руководствовались политическими соображениями, а скорее следовали строгим научным и объективным оценкам (Шафрановский и др., 1991, с. 72).

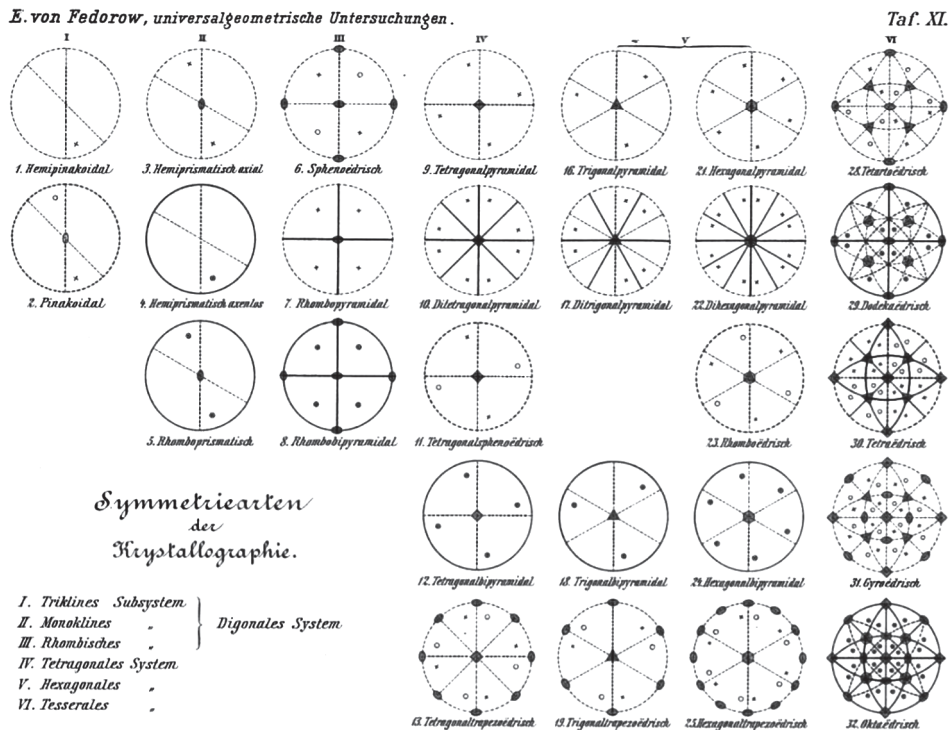
Между 1891 и 1914 годами Федоров и Грот обменялись большим количеством писем, из которых сохранились 223 письма (Шафрановский и др., 1991, Faltheiner, 1973). Кроме того, как уже упоминалось, Федоровым было опубликовано 72 статьи на немецком языке. В свое время он учился в немецком Училище Святой Анны в Санкт-Петербурге (1863–1867) (Faltheiner, 1973), благодаря чему имел базовые знания немецкого языка. Копия его рукописного письма приведена в (Шафрановский и др., 1991, с. 21). Более того, будучи политически активным студентом (Meniaïlov, 2008), он посещал Германию в 1877 году для встречи с В. Либкнехтом и А. Бебелем (Kaemmel, 2004). Грот предложил лингвистическую помощь Федорову для улучшения написания статей на немецком языке по просьбе Федорова (Шафрановский и др., 1991, с. 21, 74). Для этого Грот рекомендовал сотрудников из Мюнхена, например, доктора Ф. Хофманна (Fedorow, 1893, с. 679). Грот также попросил Федорова порекомендовать кого-нибудь, кто сможет представлять его доклады на немецком языке по статьям, написанным на русском в *Z. Kryst./section 'Extracts'*. Был назван Г. Вульф (Варшава, с 1908 г. – Москва), который затем и представил аннотации нескольких публикаций Федорова на немецком языке. Ряд статей, опубликованных Федоровым в “Записках Императорского С.-Петербургского минералогического общества”, был переведен на немецкий язык Баркером. В настоящее время редко можно встретить редакторов, проявляющих личный интерес как к науке, так и к личности авторов с одной стороны, и к авторам, обращающимся к редакторам на личном уровне – с другой.

После избрания в Баварскую академию Грот посоветовал Федорову посетить членов Академии, чтобы познакомиться с ними и другими учеными Германии лично. В частности, Грот просил Федорова уделить особое внимание описанию универсального столика (Fedorow, 1893), не только с позиций редактора *Z. Kryst.*, но и как автора учебника “Физическая кристаллография” (Groth, 1905). Федоров посетил Берлин, Гейдельберг, Вену и Мюнхен на рождественские каникулы 1898/1899, где встретился с несколькими минералогами. Встреча с Гротом в Мюнхене была для него особенной (Шафрановский и др., 1991, с. 190). Следует сказать несколько слов и о встрече с президентом Германского минералогического общества Клейном (Иоганн Фридрих Карл Клейн (1842–1907), профессор геологии Берлинского университета), которая раскрывает характер Федорова. Клейн предложил ему лично обратиться к российскому царю через правительство Германии, чтобы “продвинуть” Федорова по карьерной лестнице. Федоров же от такого предложения отказался, заявив, что настоящий ученый не должен обращаться к вышестоящим государственным органам, чтобы преследовать свои собственные интересы (Шафрановский и др., 1991, с. 189).

Грот и Федоров оба преподавали кристаллографию: первый в Мюнхене, второй в Москве и Санкт-Петербурге. Будучи в хороших отношениях, они обменивались своими учебными пособиями. Например, Грот использовал Федоровский учебник по кристаллографии и пособия, разработанные Федоровым для лекций и практических занятий. Грот же предоставил ему свой учебник по “физической кристаллографии”.

Грот и Федоров вели список точных терминов по кристаллографии (Шафрановский и др., 1991, с. 27, 34). С самого начала своих исследований в области кристаллографии и минералогии Федоров считал, что для прогресса в этой быстро развивающейся дисциплине потребуются ясные и четкие концепции и понятия. Одним из его достоинств являлась как постоянная критика противоречивых обозначений, используемых другими авторами (например, Моос (Fedorow, 1893, с. 579), Грот (Fedorow, 1895b, с. 221), Науман (Fedorow, 1893, с. 577), так и его доводы против ошибок, обнару-





**Рис. 6.** Часть рисунка, обобщающая типы симметрии “Symmetriearten der Krystallographie”, опубликованная Федоровым в *Z. Kryst.* в 1893 (Fedorow, 1893) (Таблица XI). Обратите внимание, что приведены стандартизированные графики стереографических проекций осей и плоскостей симметрии, общих позиций, а также обозначения каждого класса (номенклатура Федорова–Грота).

**Fig. 6.** Part of the figure summarizing symmetry types “Symmetriearten der Krystallographie” which was published by Fedorov in *Z. Kryst.* 1893 (Table XI). Note that standardized graphics of stereographic projections of symmetry axes and planes, poles of general position as well as designations of each class below the graphics are given (Fedorov-Groth nomenclature).

живаемых в публикациях. Например, Федоров не только критиковал ошибку в расчетах, опубликованных Теодором Либишем, но и указывал на игнорирование его критики в последующих публикациях (Fedorow, 1893, с. 700). С предложениями по стандартизированным обозначениям, используемым в “*Z. Kryst.*”, он стал известен и международному сообществу (он требовал: “... Die Fachwörter sollen ein einheitliches System bilden” (Fedorow, 1893, с. 578) (рис. 6) (“...специальные термины должны образовывать единую систему”, перевод с немецкого Ю.Л. Войтеховского).

На основании нового понимания симметрии правильной системы точек Федоров стремился стандартизировать обозначения и символы в области кристаллографии. В 1895 году он опубликовал графическое представление элементов симметрии для каждого из 230 типов пространственных групп (Fedorow, 1895b), а в следующем году совместимые с ними параллелоэдры (Fedorow, 1896). Он предполагал, что морфология кристаллов отражает их внутреннюю структуру. Федоров приписал систему обозначений параллелоэдрам, что привело к весьма напряженной дискуссии с Паулем Гротом.

В приложении к статье Федоров заявил о согласии с Гротом (Fedorow, 1896): “Es gewährt mir eine sehr grosse Genugthuung, in dem eben erschienenen Buche “Physikalische Krys-

tallographie" (Groth, 1905) von einem so namhaften Spezialisten, wie Herr Prof. P. Groth, die Annahme einer krystallographischen Nomenklatur zu sehen, welche mit der von mir seit Jahren in allen meinen Werken gebrauchten wesentlich übereinstimmt" ("Мне доставляет очень большое удовлетворение видеть в только что опубликованной книге "Физическая кристаллография" (Groth, 1905) столь именитого специалиста, как г-н проф. П. Грот, принятие кристаллографической номенклатуры, которая по существу совпадает с используемой мною уже несколько лет во всех моих работах" *перевод с немецкого Ю.Л. Войтеховского*). Однако, некоторые разногласия все же остались.

### 3.2. Новое экспериментальное оборудование для кристаллографических исследований

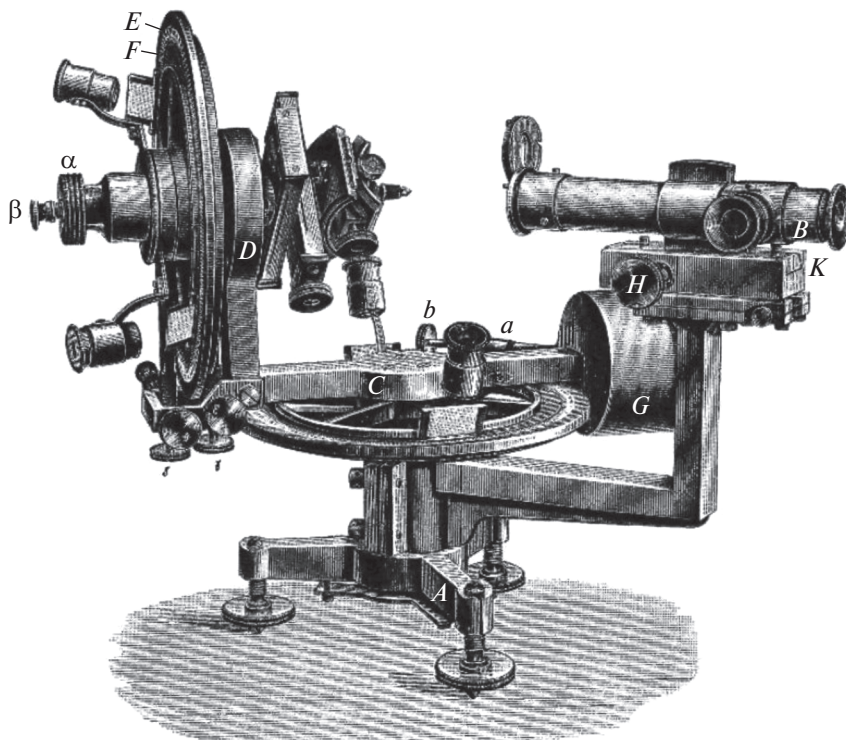
Вторая часть работы Федорова включает разработку универсального гониометра (рис. 7), столика для оптической микроскопии (рис. 8) и различных новых методов оценки получаемых данных. Грот проявил к этому особый интерес и побудил Федорова опубликовать в *Z. Kryst* как результаты его работ (Федоров, 1890, 1891, 1891b; Fedorow, 1909b; Laue, 1912; Sokolow et al, 1911; Šafranovski, Belov, 1962; Burckhardt, 1971; Nowacki, 1972; Faltheiner, 1973; Шафрановский и др., 1991, Федорова, 1992; Федоров, 1999; Галиулин, 2003; Menailov, 2008; Fedorow, 1893a, 1893b), так и переведенные версии ранее опубликованных русскоязычных статей (Senechal, Galiulin, 1984; Scholz, 1989). Кроме того, в этом журнале были опубликованы и переведенные обширные выдержки из важных русскоязычных работ Федорова (среди них и экспериментальные достижения, которые облегчают повседневную работу, например, (Fedorow, 1892, 1895, 1895a, 1903, 1909, 1909a, 1909b). Работа с описанием двухкружного гониометра Федорова, или теодолитного гониометра, появилась в 1893 году (Fedorow, 1893) почти одновременно с похожими устройствами Гольдшмидта (Goldschmidt, 1893) и Чапского (Czapski, 1893, 1893a). Приоритет, однако, принадлежит Федорову из-за опубликованного им еще в 1889 г. краткого сообщения, представленного в Минералогическом обществе Санкт-Петербурга (см. (Fedorow, 1893, с. 574)).

Большое внимание привлек и столик Федорова (рис. 8), разработанный для измерения оптических свойств кристаллов. В зависимости от симметрии кристалла, представляется возможным измерять до пяти оптических значений: три основных показателя преломления, оптический угол и ориентация основных направлений колебаний относительно кристаллографических координат (Fedorow, 1894). При этом требуется высокая точность, и многое зависит от мастерства механика. Федоров, к счастью, упомянул в работе механика Петермана (см., например, (Fedorow, 1893, с. 603)). Грот высоко оценил перспективы использования этого прибора и связался с немецким механиком Генрихом Людвигом Рудольфом Фюссом (1838–1917), являвшимся ведущим производителем подобных оптических инструментов в Германии. Воодушевленный публикацией Федорова, Фюсс создал модель, которую Федоров впоследствии одобрил (Шафрановский и др., 1991, с. 61), и дал рекомендации для её дальнейшего улучшения.

Для работы с данными, получаемыми с помощью гониометра и столика Федорова, ему понадобились инструменты для обработки стереографических проекций (рис. 9). Поэтому в 1896 году он предложил печатать стереографические сетки (диаметром 10 см), чтобы облегчить стереографическое проецирование кристаллов для каждого кристаллографа (Шафрановский и др., 1991, с. 73, 74). Позже типография Вильгельма Энгельмана (Лейпциг, Германия) предложила образцы таких сеток. Даже в XX веке многие учебники по кристаллографии содержали стандартные проекции для удобства читателя.

### 3.3. От морфологии к кристаллохимии

Существование пространственных групп стимулировало появление структурных работ в конце 19-го века (например, Barlow, 1897). Начиная с новаторских работ Федорова, многочисленные экспериментальные данные по кристаллическим структурам



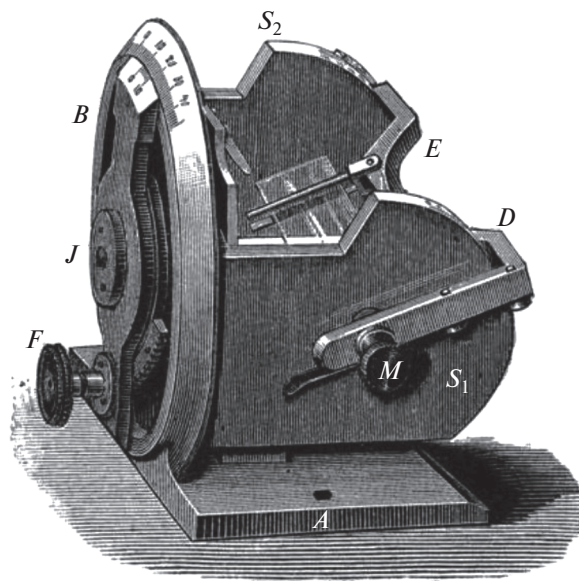
\*) Die erste Beschreibung des Apparates und die Angaben der mittelst derselben erzielten Vortheile publicirte ich schon i. J. 1889 (Verhandl. d. k. Mineral. Ges. 26, 458). Neuerdings hat der Verfertiger desselben, Herr Mechan. Petermann, für die kais. Akad. d. Wiss. ein zweites, mehrfach verbessertes Exemplar hergestellt.

**Рис. 7.** Универсальный (теодолитный) метод в минералогии и петрографии. В сноске Федоров упоминает, что первая версия этого прибора была опубликована уже в 1889 году и что механик Петерманн недавно создал улучшенный в несколько раз второй образец (Fedorow, 1893, с. 603, рис. 3).

**Fig. 7.** Universal (Theodolite) Method in Mineralogy and Petrography. In the footnote Fedorov mentions that the first version of this equipment has been published already in 1889 and that the mechanic Petermann recently performed a second sample, which has been improved several times.

были собраны в базах данных. Примерами являются “База данных неорганических кристаллических структур (ICSD)”, содержащая в 2019 году более 200000 неорганических кристаллических структур, и “Кембриджская структурная база данных (CSD)”, которая в конце 2019 года достигла одного миллиона органических и металлоорганических кристаллических структур.

Хотя Федоров и выявил в общей сложности 230 групп, вскоре стало ясно, что их распространенность неравномерна. Определенные комбинации пространственной симметрии, очевидно, могут быть предпочтительнее для упаковки конкретных структурных единиц. В то время как наиболее часто встречаемой пространственной группой для минералов и неорганических соединений является ромбическая  $Pnma$  (№ 62), тетрагональная пространственная группа  $P4_2cm$  (№ 101) до сих пор, похоже, не представлена среди минералов, согласно Филатову (2019). Однако, распределение зависит

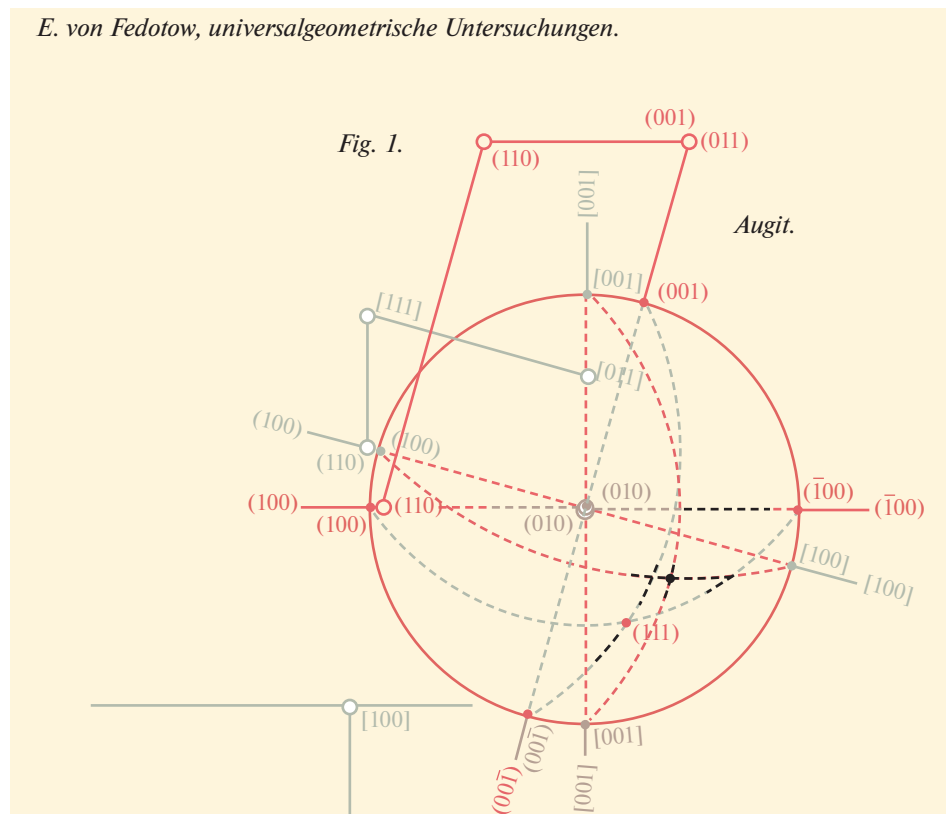


**Рис. 8.** Универсальный столик (столик Федорова) с независимыми наклоняющимися ( $J$ ) и вращающимися ( $M$ ) осями. Образец помещают на стеклянную пластину (указаны две точки держателя образца  $D$  и  $E$ , которые можно вращать вокруг оси  $M$ ). Две оси позволяют ориентировать кристаллографическую и оптическую плоскости кристалла на систему счета микроскопа. Прибор позволял проводить быстрые измерения оптических свойств с использованием тонких срезов минералов. Позже он был усовершенствован пятью осями вращения для исследования в любом поперечном сечении. (Fedorow, 1894, с. 235, рис. 2).

**Fig. 8.** Microscope Universal Stage (U-Stage or Fedorov stage) with independently tilting ( $J$ ) and rotating ( $M$ ) axes. The specimen is placed on a glass plate (two points of the sample holder  $D$  and  $E$  are indicated, which may be rotated around axis  $M$ ). The two axes enable to orient crystallographic and optical planes of the crystal to the reference system of the microscope. The device allowed quick measurements of optical properties using thin sections of minerals. Later on, it has been refined with five axes of rotation for the study in any cross section.

от симметрии структурной единицы. Например, органические соединения чаще всего кристаллизуются в моноклинной пространственной группе  $P2_1/c$  (№ 14).

Используя универсальный метод, Федоров собрал многочисленные данные о морфологии кристаллов и показателях преломления. Первоначальная цель этих экспериментов состояла в том, чтобы определить пространственную группу или, по меньшей мере, диагностировать кристалл по точным макроскопическим измерениям углов граней. Чтобы продемонстрировать эффективность своего кристаллохимического анализа, Федоров попросил Грота отправить ему несколько кристаллов для идентификации. Грот ответил 22 ноября 1910 года, предоставив 28 образцов (Шафрановский и др., 1991, с. 140), свойства которых были ему заранее известны. В письме от 8 декабря 1910 г. Федоров сообщил о первых результатах, которые затем были подтверждены Гротом. В 1911 г. (рукопись, полученная Российской академией 26 октября 1911 г.), он завершил сбор данных работой “Das Krystallreich. Tabellen zur krystallochemischen Analyse” (“Царство кристаллов. Таблицы для кристаллохимического анализа”), описывающей 10000 веществ на 1050 страницах и включающий атлас из более чем 100 таблиц (Fedorow et al., 1920) (рис. 10). Грот проявил живой интерес к работе, обновив и свой учебник “Chemische Kristallographie” (книга, изданная в четырех томах В. Энгельманом (Лейпциг), 1906–1919 гг., которой пользовался Федоров). Когда Грот запросил



**Рис. 9.** Универсальные геометрические измерения. Комбинированная стереографическая и гномическая проекции кристаллических форм и ребер, которые использовал Е.В. Федоров. Грани выделены красным цветом, зоны – синим (Fedorow, 1893, Таблица XIII).

**Fig. 9.** Universal geometrical studies. Combined stereographic and gnomonic projection of crystal forms and edges used by E.S. Fedorov. Faces appear in red color, zones in blue.

обновленные значения углов, представленных в его книге, Федоров предложил отправить для этого студента в Санкт-Петербург (Шафрановский и др., 1991, с. 145).

Открытие дифракции рентгеновских лучей в 1912 г. фон Лауэ, Фридрихом и Кнопингом (Friedrich et al., 1912; Laue, 1912), а также первый анализ кристаллической структуры, проведенный У. Л. Брэггом и У. Х. Брэггом (Bragg, Bragg, 1913; Bragg, 1913) снизили интерес к изучению морфологии кристаллов. Более того, из-за Первой мировой войны таблицы не могли быть напечатаны. Позже, однако, Российская академия опубликовала работу, сохранив это сокровище. Рукопись была отправлена в печать в 1918 году. Автор принял участие в исправлениях, но не дожид до ее выхода из-за болезни в 1919 году. Работа же появилась после декабря 1920 года.

В 1912 году Федоров изложил свое видение на предмет того, как работать с таблицами (Fedorow, 1912) появления которых он ожидал в ближайшем будущем. Разрабатывая основы своего кристаллохимического анализа, он выделил следующие аспекты: (1) Кристаллография относится к главным физико-химическим дисциплинам. Ее основной предмет – морфология кристаллов. Многочисленные исследователи собирали данные по углам граней столетиями. Вначале они могли успешно использоваться для

**ЗАПИСКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУКЪ.**  
MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE RUSSIE.  
**VIII<sup>e</sup> SÉRIE.**

ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОМУ ОТДЕЛЕНИЮ.  
**Томъ XXXVI.**

CLASSE PHYSICO-MATHÉMATIQUE.  
**Volume XXXVI.**

# DAS KRYSTALLREICH.

TABELLEN

## ZUR KRYSTALLOCHEMISCHEN ANALYSE.

Von

**E. von Fedorow**

unter Mitwirkung von

**D. Artemiev, Th. Barker, B. Orelkin und W. Sokolov.**

MIT ATLAS.

(Der Akademie vorgelegt am 26. Oktober 1911).

### ATLAS.

ПЕТРОГРАДЪ. 1920. PETROGRAD.

**Рис. 10.** Е.С. Федоров, Титульный лист “Das Krystallreich”. (“Царство кристаллов”), Петроград, 1920 (Fedorow et al., 1920).

**Fig. 10.** E.S. Fedorov, Title page of “Das Krystallreich.” (“The realm of crystals”), Petrograd 1920.

идентификации хорошо закристаллизованного образца. С увеличением количества и сложности известных минералов метод становился все более неоднозначным. (2) Хотя тезис о постоянстве углов весьма надежен (Stensen, 1923) кристаллические формы (совокупность всех симметрично эквивалентных граней), возникающие при различных условиях роста, не подчинялись закону постоянства углов. С целью выявления правила постоянства углов Федоров считал необходимым отнесение индексов Миллера к стандартизированным координатам. Он также предложил стандартные обозначения кристаллических форм (Fedorow, 1893). (3) Собрав данные по тысяче кристаллических форм, Федоров обнаружил, что некоторые из них оказались константами. Их указа-

ние в таблице должно помочь идентифицировать кристалл. В среднем не более 10 форм принадлежали тому или иному веществу. Кроме того, в соответствии с их изобилием они были ранжированы. Также приводились плоскости спайности для повышения точности анализа морфологии. (4) Образование этих форм сильно зависит от примесей в обеспечивающем рост кристалла растворе. (5) Учитывая, что существуют типичные формы, они должны быть представлены в изоморфном ряду. Эйльхард Митчерлих, немецкий химик и минералог, заметил, что некоторые соли калия кристаллизовались с одинаковыми формами (Mitscherlich, 1820). Федоров определил изоморфные ряды, насчитывающие до 54 членов с общей формулой  $(XO_4)_2NM_2 \cdot 6H_2O$ , где  $X = S, Se, Cr$ ;  $N = Mg, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Cd$ ;  $M = K, Rb, Cs, NH_4, Tl$  (Fedorow, 1912, с. 518). (6) Кристаллические формы с самой высокой растворимостью и, следовательно, с максимальной ретикулярной плотностью оказались наиболее важными. Ретикулярная плотность (Fedorow, 1902; Sokolow et al., 1911) определяется как число “атомов” на единицу площади в конкретной плоскости сетки  $\{hkl\}$ . На рубеже 20-го века концепция “атома” была еще неопределенной. Тем не менее, последняя чисто геометрическая характеристика может служить только первым приближением растворимости. Было рекомендовано определять как можно больше других характеристик с целью ускорения анализа. (7) Наконец, Федоров представил множество реальных примеров, на которых он объяснил свою кристаллохимическую концепцию.

Хотя его надежда определить таким образом пространственную группу и не сбылась, Федоров успешно продемонстрировал суть количественного анализа морфологии кристаллов. С помощью аккуратного измерения только внешней формы кристалла представилось возможным быстро идентифицировать любое кристаллическое вещество, для которого имелись данные в “Das Krystallreich” (Fedorow et al., 1920).

#### 4. 100 ЛЕТ СПУСТЯ: ПОСТКЛАССИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

После того, как в конце 19-го века Федоров, Шёнфлис и Барлоу вывели 230 типов пространственных групп (роль Уильяма Барлоу была рассмотрена недавно (Paufler, 2019)), понятие групп симметрии в 20-м веке было расширено. Сам Федоров сделал первый шаг к симметрии в двух измерениях (Федоров, 1891) в качестве поправки к своим основным публикациям по симметрии правильных систем фигур (Федоров, 1889; Fedorow, 1891a). В конце концов он определил правильную систему как совокупность конечных фигур, которая существует во всех направлениях бесконечно (Fedorow, 1891a, стр. 10) (дополненная версия (Fedorow, 1900)). Федоров вывел 17 плоских групп симметрии “сетчатых орнаментов”, не имеющих фиксированных, т.е. неподвижных точек, если нет верхней и нижней сторон двухпериодической картины. Итак, он завершил вывод Зонке, который ранее обнаружил первые 13 групп (Sohncke, 1874).

В зависимости от вида порядка, выявленного с помощью современных методов рентгеновской, нейтронной, позитронной или электронной дифракции, были разработаны соответствующие концепции симметрии. Упомянем лишь некоторые из них, а, чтобы проиллюстрировать разнообразие, мы обращаемся к литературе за более подробной информацией.

Как результат обработки Федоровым двумерных картин, Ниггли (Niggli, 1924) возобновил работу над этой темой, ссылаясь на растущий к ней интерес (Pólya, 1924). Принимая во внимание верхнюю и нижнюю стороны плоскости, 80 плоских пространственных групп (А.В. Шубников называет их группами симметрии слоев) привели к описанию ее симметрии. Несколько авторов (Герман (Hermann, 1929), Вебер (Weber, 1929) Александер и Херрманн (Alexander, Hermann, 1929) и Хиш (Heesch, 1929)) сосредоточили свои работы на этом. Ограничивая и далее размерность, была рассмотрена симметрия плоских групп “сетчатых орнаментов”, которая долгое время очаровывала людей. Семь групп симметрии сохранились (Niggli, 1926). В случае непо-

лярной плоскости число групп симметрии увеличивается до 31 группы симметрии лент (Alexander, 1929) (см. также Jones, 1856). В конце концов, была учтена симметрия фигур, характеризующихся определенным конечным расстоянием до фиксированного направления (симметрия стержня). Подробности см. в работах Германа (Herzmann, 1929), Александра (Alexander, 1929), Шубникова, Копчика (1972).

Первый шаг к  $n$ -мерной кристаллографии был осуществлен путем принятия четырехмерных точечных симметрий в трехмерном пространстве Генрихом Хишем (25 июня 1906 г., Киль—26 июля 1995 г., Ганновер; немецкий математик (Bigalke, 1988)) (Heesch, 1930) и Алексеем Васильевичем Шубниковым (29 марта 1887 г., Москва—27 марта 1970 г., Москва), русским кристаллографом (Шубников, 1945). Введение операции антисимметрии, которая изменяет характер заданного свойства (например, меняет заряд между плюсом и минусом; магнитный момент вверх и вниз; цвет между черным и белым и т.д.), увеличивает количество точечных групп в целом до 122, т.е. 32 традиционных (полярных, или “белых”), 32 “появившихся” (содержащих инверсию, а также пары вращения/антивращения) и 58 “черно-белых” групп (также называемых “классами антисимметрии Шубникова” (Копчик, 1966)). Применяя операции антисимметрии к семи непрерывным группам симметрии (группам Кюри), которые были введены П. Кюри (Curie, 1894) и разработаны далее Шубниковым (Schubnikow, 1930) и Хишем (Heesch, 1930a), в результате возникла 21 непрерывная группа, так что число черно-белых точечных групп увеличилось до 143. Для полной систематики антисимметричных точечных групп, включая непрерывные группы, см. (Шубников, 1961). Он же описал 13 непрерывных точечных групп симметрии антисимметрии текстур (Шубников, 1958).

В 1949 г. первые структуры магнитных кристаллов были определены с помощью нейтронографии (Shull et al., 1949). Оказалось, что порядок спина не всегда соответствует элементарной ячейке. Следовательно, магнитная структура обладает собственной симметрией. Это было отправной точкой многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, в частности, Шубникова, Белова и их школ. Мы просто упомянем несколько основных моментов. Когда в 1956 году Тавгер и Зайцев (1956) вывели симметрию магнитных точек, применяя преобразование времени вместо операции антисимметрии, они осознали тождественность своих 58 групп симметрии черным и белым точкам симметрии Шубникова (Шубников, 1951).

Обобщение пространственных групп Федорова (или типов пространственных групп, см. Wondratschek, 2002) было достигнуто путем объединения кристаллографических операций симметрии с инверсией времени, анти-трансляциями, анти-вращениями, анти-винтовыми операциями, анти-отражениями и анти-инверсиями. Впервые создал эти группы А.М. Заморзаев. В своей диссертации (1953) он представил в общей сложности 1652 группы. Используя другой метод, Белов и др. (1955) закончили с правильным выводом 1651 членов. Они называются антисимметричными, дихроматическими, черно-белыми, группами Хиша-Шубникова или Шубникова. Графическая компиляция их элементов симметрии дана Копчиком (1966).

Здесь должно быть упомянуто еще одно направление развития идей Федорова. Одним из основных столпов кристаллографии 19-го века являлся постулат о периодичности решетки, на что указывали в начале 20-го века интенсивные пятна на рентгенограммах. Хотя различные дефекты решетки в атомном масштабе наблюдались еще до Второй мировой войны, глобальные отклонения от периодичности стали выявляться впоследствии и породили новые концепции симметрии. Примерами являются аперидические кристаллы, лишенные трансляционной симметрии (Janssen, Janner, 2014). Среди них несоразмерные структуры с периодической модуляцией атомных позиций, которые не соответствуют периодичности решетки, и квазикристаллы, симметрия которых несовместима с периодичностью решетки. Поразительной особенностью является появление “некристаллографических” симметрий, подобных пятикратным осям



(Shechtman et al., 1984). Концепции описания в  $n$ -мерном суперпространстве и в еще более обобщенном пространстве-времени позволяют широко взглянуть на структуру и свойства твердых тел.

Ввиду концепции несоизмерных структур, напомним замечательный пример эффективности точных морфологических измерений. Это относится к минералу калавериту ( $\text{Au}_{1-x}\text{Ag}_x\text{Te}_2$ ). Смит (Smith, 1903) не мог морфологически однозначно индексировать все формы и предположил нетрадиционную структуру; Федоров (Fedorow, 1903a) пересчитал данные Смита, признал трудности с индексацией, но побоялся констатировать принципиально новый порядок. В 1931 году Goldschmidt et al. (1931) повторили морфологические измерения, опять же с аномальными гранями с высоким индексом. Но только в 1989 году Яннер и Дам (Janner, Dam, 1989) смогли дать всем граням кристалла четыре индекса ( $hklm$ ), используя четвертый базисный вектор. Был сделан вывод, что калаверит имеет несоизмеримо модулированную структуру. Недавно модуляция атомных позиций была объяснена на уровне теории электронов (Streltsov et al., 2018).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выдающиеся достижения Федорова в области теории симметрии, геометрии полиэдров, микроскопии минералов и горных пород, а также кристаллохимического анализа составляют основу современного естествознания.

С 1892 по 1915 год работы Федорова стали известны научному сообществу Европы и других стран благодаря публикациям в журнале “*Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*” (*Z. Kryst.*). Благодаря этому он смог установить тесное сотрудничество с немецкими кристаллографами, минералогами, геологами, математиками и механиками, как, например, с А. Шёнфлисом, П. Гротом, Л. Зонке, К. Клейном и Р. Фюссом.

Плодотворная переписка между Федоровым и Шёнфлисом ускорила вывод 230 пространственных групп. Дружеские взаимоотношения, а также переписка с редактором *Z. Kryst.* Гротом способствовали созданию точных определений и символов, установив высокий уровень для развивающейся кристаллографии. Поскольку Федоров являлся и строгим рецензентом, он участвовал в нескольких поучительных дискуссиях в журнале на благо как коллег, так и свое.

При просмотре более 70 статей Е.С. Федорова, написанных на немецком языке, следующие особенности его работ становятся очевидными: (1) Охвачено широкое поле тем, включая как оригинальные теоретические, так и экспериментальные методы. Федоров разработал четырехосевой универсальный гониометр для точного измерения углов, универсальный столик для микроскопического определения оптических свойств и различные новые методы для оценки данных. (2) В отличие от многих других кристаллографов и минералогов того времени, Федоров предпочитал применять эффективные математические методы. (3) Его публикации о пространственных группах и полученных с их помощью моделях структур оказались необходимыми для того, чтобы проложить путь для количественного определения кристаллических структур с использованием дифракции рентгеновских лучей У.Л. и У.Х. Брэггами в 1913 г.

Его выдающийся вклад в кристаллографию являлся результатом его активного участия в международном развитии кристаллографии, особой признательности его трудов со стороны немецких кристаллографов, избравших его членом-корреспондентом Баварской Академии наук, выдвижение на которого было инициировано Паулем фон Гротом и подписано Леонардом Зонке. Незадолго до смерти он был избран действительным членом Академии наук СССР в 1919 году.

Авторы признательны рецензенту, профессору Юрию Леонидовичу Войтеховскому за прочтение этой статьи, ценные советы и замечания. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект No. 18-29-12106).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 5 + 50 лет геологический факультет СПбГУ, история выпуска 1958–1963. СПб, Петродворец: Изд-во СОЛО, 2013. 345 с.
- Белов Н.В., Неронова Н.Н., Смирнова Т.С. 1651 шубниковская группа // Кристаллография. 1955. № 2. С. 315–325.
- Бокий Г.Б., Шафрановский И.И. Вывод 230 пространственных групп симметрии. Научное наследство. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1951. С. 297–313.
- Бокий Г.Б., Шафрановский И.И. Из переписки Е.С. Федорова с А. Шенфлисом. Научное наследство. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1951а. С. 314–340.
- Галиулин Р.В. К 150-летию Евграфа Степановича Федорова (1853–1919): Неправильности в судьбе теории правильности // Кристаллография. 2003. Т. 48. № 6. С. 965–980.
- Заморзаев А.М. Обобщение федоровских групп. Кристаллография, 1957. № 2. С. 15–20.
- Копцик В.А. Шубниковские группы. Справочник по симметрии и физическим свойствам кристаллических структур / Под ред. акад. Н.В. Белова. М.: МГУ, 1966. 724 с.
- Тавгер Б.А., Зайцев В.М. Магнитная симметрия кристаллов // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. № 3. С. 564–568.
- Федоров Е.С. Очерки, воспоминания современников, материалы. / Сост. и ред. В.А. Франк-Каменецкий. СПб.: СПбГУ. 1999. 140 с. (Тр. СПб. об-ва естествоисп. Сер. 1. Т. 93).
- Федоров Е.С. Протокол обыкновенного заседания 21-го ноября 1889 года // Записки СПб. минерал. об-ва. 1890. Ч. 26. С. 451–455.
- Федоров Е.С. Симметрия конечных фигур. СПб.: тип. А. Якобсона, 1888. 52 с.; То же // Зап. СПб. минерал. об-ва. 1889. Ч. 25. С. 1–52.
- Федоров Е.С. Симметрия на плоскости // Зап. СПб. минерал. об-ва. 1891. Ч. 28. С. 345–390. Отд. изд.: СПб.: тип. А. Якобсона, 1891. 46 с.
- Федоров Е.С. Симметрия правильных систем фигур // Зап. СПб. минерал. об-ва. 1891а. Ч. 28. С. 1–146.
- Федорова Л.В. Наши будни, радости и горести. Воспоминания. Научное наследство. Т. 20. Л.: Наука, 1992. 370 с.
- Филатов С.К. Симметричная статистика минеральных видов в различных термодинамических обстановках // ЗРМО. 2019. № 5. С. 1–13.
- Шафрановский И.И., Франк-Каменецкий В.А., Доливо-Добровольская Е.М. Евграф Степанович Федоров: Переписка. Неизданные и малоизвестные работы. Научное наследство. Т. 16. Л.: Наука, 1991. 318 с.
- Шубников А.В. Антисимметрия текстур // Кристаллография. 1958. Т. 3. С. 263–268.
- Шубников А.В. Новое в учении о симметрии и его применении. Сб. отчет об общем собрании АН СССР 14–17 октября 1944 г. Москва: Изд. АН СССР, 1945.
- Шубников А.В. Полная систематика точечных черно-белых групп // Кристаллография. 1961. №. 6. С. 490–495.
- Шубников А.В. Симметричная и антисимметрия конечных фигур. Изд. АН СССР: Москва, 1951.
- Шубников А.В., Копцик В.А. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972. 340 с.

## E.S. Fedorov Promoting the Russian-German Scientific Interrelationship

Peter Paufler<sup>a,\*</sup> and Stanislav K. Filatov<sup>b,\*\*</sup><sup>a</sup>*Inst. f. Festkörper- u. Materialphysik, Fakultät Physik, TU Dresden, Dresden, 01062 Germany*<sup>b</sup>*Department of Crystallography, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia*\**e-mail: peter.paufler@tu-dresden.de*\*\**e-mail: filatov.stanislav@gmail.com*

At the dawn of crystal structure analysis, the close personal contact between researchers in Russia and Germany, well documented in the “*Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*”, contributed significantly to the evolution of our present knowledge of the crystalline state. The impact of the Russian crystallographer E.S. Fedorov upon German scientists such as A. Schoenflies and P. Groth and the effect of these contacts for Fedorov are highlighted hundred years after the death of the latter. A creative exchange of ideas paved the way for the analysis of crystal structures with the aid of X-ray diffraction.

*Keywords:* E.S. Fedorov, A. Schoenflies, W. Barlow, space group types, Russian-German interrelations, *Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie*

## REFERENCES

- 5+50 years Geological Faculty, history of the age-group 1958–1963. Saint-Peterburg: SOLO, **2013**. 345 p. (in Russian).
- Alexander E. Systematik der eindimensionalen Raumgruppen. (Systematics of one-dimensional space groups). *Z. Krist.* **1929**. Vol. 70. P. 367–382.
- Alexander E., Herrmann K. Die 80 zweidimensionalen Raumgruppen. (The 80 two-dimensional space groups). *Z. Krist.* **1929**. Vol. 70. P. 328–345.
- Authier A. Early Days of X-ray Crystallography. IUCr Oxford University Press: Oxford, UK, **2013**.
- Barlow W. A mechanical cause of homogeneity of structure and symmetry geometrically investigated; with special application to crystals and to chemical combination. *Sci. Proc. Roy. Dublin Soc.* **1897**. Vol. 8. P. 527–690.
- Belov N.V., Neronova N.N., Smirnova T.S. 1651 Shubnikov groups. *Kristallografija.* **1955**. N 2. P. 315–325 (in Russian).
- Bigalke H.G. Heinrich Heesch. Kristallgeometrie, Parkettierungen, Vierfarbenforschung. (Heinrich Heesch. Crystal Geometry, Tessellations, Four-Color Research) Birkhäuser: Berlin, Germany, **1988**.
- Bokij G.B., Shafranovskij I.I. From the correspondence between E. S. Fedorov and A. Schoenflies. In: *Science Heritage*. Vol. 2. Moscow: USSR Acad. Sci, **1951**. P. 314–340 (in Russian).
- Bokij G.B., Shafranovskij I.I. Derivation of 230 symmetry groups in space. In: *Science Heritage*, Vol. 2. Moscow: USSR Acad. Sci., **1951**. P. 297–313 (in Russian).
- Bragg W.H., Bragg W.L. The reflection of X-rays by crystals. *Proc. R. Soc.* **1913**. Vol. A88. P. 428–438.
- Bragg W.L. The structure of some crystals as indicated by their diffraction of X-rays. *Proc. R. Soc.* **1913**. Vol. A89. P. 248–277.
- Burckhardt J.J. Der Briefwechsel von E. S. von Fedorow und A. Schoenflies, 1889–1908 (The correspondence between E. S. von Fedorow and A. Schoenflies). *Arch. Hist. Exact Sci.* **1971**. Vol. 7. P. 91–141.
- Burckhardt J.J. Zur Geschichte der Entdeckung der 230 Raumgruppen (About the history of discovery of the 230 space groups). *Arch. Hist. Exact Sci.* **1967**. Vol. 4. P. 235–246.
- Curie P. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique. *J. Phys. Théor. Appl.* **1894**. Vol. 3. P. 393–415.
- Czapski S. Ein neues Krystallgoniometer. (A new crystal goniometer.) *Z. Instrum.* **1893**. Vol. 13. P. 1–5.
- Czapski S. Ueber Goniometer mit zwei Kreisen. (About two-circle goniometers.) *Z. Instrum.* **1893a**. Vol. 13. P. 242–244.
- Faltheiner O. Briefwechsel E. S. v. Fedorow (St. Petersburg)—P. H. v. Groth (München): Ein histor. Dokument zum Ende d. klass. Kristallographie. (Correspondence E. S. v. Fedorow (St. Petersburg)—P. H. v. Groth (Munich): A Historic Document at the End of the Classical Crystallography.) PhD Thesis, TU München, Fak. f. allg. Wiss., München, Germany, **1973**.
- Faltheiner O. Ein Münchener Mineraloge aus Sachsen. Skizzen zur Geschichte der Mineralogie als Erinnerung an Paul v. Groth anlässlich seiner Berufung nach München vor 100 Jahren. (A Munich mineralogist from Saxony. Sketches on the history of mineralogy in remembrance of Paul v. Groth on the occasion of his appointment to Munich 100 years ago). *Kult. und Tech.* **1985**. Vol. 1. P. 44–53.
- Fedorov E.S. Symmetry of finite figures. *Proc. Imp. St.-Petersburg Miner. Soc.* **1889**. Vol. 25. P. 1–52 (in Russian).
- Fedorov E.S. Minutes of the regular session of 21 November 1889. *Proc. Imp. St.-Petersburg Miner. Soc.* **1890**. Vol. 26. P. 451–455 (in Russian).
- Fedorov E.S. Symmetry in the plane. *Proc. Imp. St.-Petersburg Miner. Soc.* **1891**. Vol. 28. 46 p. (in Russian).
- Fedorov E.S. Symmetry of regular systems of figures. *Proc. Imp. St.-Petersburg Miner. Soc.* **1891a**. Vol. 28. P. 1–146 (in Russian).
- Fedorov E.S. Essays, Reminiscences of Contemporaries, Materials. Eds. Frank-Kameneckij V.A., Shafranovskij I.I., Glazov A.I. Saint-Petersburg: SPbSU, **1999**. 144 p. (in Russian).
- Fedorova L.V. Our everyday life, joys and sorrows. Reminiscences. In: *Nauchnoe nasledstvo*. Vol. 20. Saint-Petersburg: Nauka, **1992**. 370 p. (in Russian).
- Fedorow E. Ueber seine beiden Werke: 1. Die Symmetrie der endlichen Figuren. 2. Die Symmetrie der regelmässigen Systeme der Figuren. (About both of his works: 1. The symmetry of finite figures. 2. The symmetry of regular systems of figures.) *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, **1891**. Vol. 1. P. 113–116.
- Fedorow E.v. Zusammenstellung der kristallographischen Resultate des Herrn Schoenflies und der meinigen. (Compilation of the crystallographic results of Mr. Schoenflies and of mine). *Z. Kryst.* **1892**. Vol. 20. P. 25–75.

*Fedorow E.v.* Auflösung einiger Aufgaben der stereographischen Projektion. (Solution of some exercises of stereographic projection). *Z. Kryst.* **1892a**. Vol. 20. P. 357–361.

*Fedorow E.v.* Universal-(Theodolith-) Methode in der Mineralogie und Petrographie. I. Theil. (Universal (Theodolith) method in mineralogy and petrography. Part I). *Z. Kryst.* **1893**. Vol. 21. P. 574–714.

*Fedorow E.v.* Elemente der Gestaltenlehre. (Translation from “Verhandl. d. k. russ. min. Ges. St. Petersburg 21(1885)1-279”). *Z. Kryst.* **1893a**. Vol. 21. P. 679–694.

*Fedorow E.v.* Analytisch–krystallographische Studien. (Translation from “Bergjournal St. Pet. 1885, Nr. 4, 85–118; Nr. 5, 222–242”). *Z. Kryst.* **1893b**. Vol. 21. P. 694–714.

*Fedorow E.v.* Universal-(Theodolith-) Methode in der Mineralogie und Petrographie II. Theil. Krystalloptische Untersuchungen. (Universal (Theodolith) method in mineralogy and petrography. Part II. Crystalloptical studies). *Z. Kryst.* **1894**. Vol. 22. P. 229–268.

*Fedorow E.v.* Die einfachste Form des Universaltschens. (The simplest form of the universal table). *Z. Kryst.* **1895**. Vol. 24. P. 602–603.

*Fedorow E.v.* Einfaches Verfahren zur Bestimmung des absoluten optischen Zeichens eines unregelmässigen Mineralkörnchens in Dünnschliffen. (Simple procedure to determine the absolute optical sign of an irregular mineral granule in a transparent cut). *Z. Kryst.* **1895a**. Vol. 24. P. 603–605.

*Fedorow E.v.* Theorie der Krystalstruktur. Einleitung. Regelmässige Punktsysteme (mit übersichtlicher graphischer Darstellung). (Theory of crystal structure. Introduction. Regular point systems (with clearly arranged graphics)). *Z. Kryst.* **1895b**. Vol. 24. P. 209–252.

*Fedorow E.v.* Die zu den optischen Axen normalen Schnitte der Plagioklase. *Z. Kryst.* **1896a**. Vol. 25. P. 94–95.

*Fedorow E.v.* Zur Bestimmung der Feldspäthe und des Quarzes in Dünnschliffen. *Z. Kryst.* **1895c**. Vol. 24. P. 130–132.

*Fedorow E.v.* Theorie der Krystalstruktur. I. Theil. Mögliche Structurarten. (Theory of crystal structure. Part I. Possible kinds of structure). *Z. Kryst.* **1896**. Vol. 25. P. 113–224.

*Fedorow E.v.* Optische Mittheilungen. 1. Ueber einen Glimmerkomparator. 2. Noch ein Schritt in der Anwendung der Universalmethode zu optischen Studien. *Z. Kryst.* **1896b**. Vol. 25. P. 349–356.

*Fedorow E.v.* Universalmethode und Feldspathstudien. I. Methodische Verfahren. *Z. Kryst.* **1896c**. Vol. 26. P. 225–261.

*Fedorow E.v.* Universalmethode und Feldspathstudien. II. Feldspathbestimmungen. *Z. Kryst.* **1897**. Vol. 27. P. 337–398.

*Fedorow E.v.* Universalmethode und Feldspathstudien. III. Die Feldspäthe des Bogoslawski'schen Bergreviers. *Z. Kryst.* **1898**. Vol. 29. P. 604–658.

*Fedorow E.v.* Ueber Krystalzeichnen. *Z. Kryst.* **1899**. Vol. 30. P. 9–16.

*Fedorow E.v.* Mikroskopische Bestimmung des Periklingesetzes. *Z. Kryst.* **1900a**. Vol. 32. P. 246–249.

*Fedorow E.v.* Beiträge zur zonalen Krystallographie. 1. Ein besonderer Gang der zonalen Formentwicklung. *Z. Kryst.* **1900b**. Vol. 32. P. 446–464.

*Fedorow E.v.* Zur Theorie der krystallographischen Projectionen. *Z. Kryst.* **1900c**. Vol. 33. P. 589–598.

*Fedorow E.v.* Reguläre Plan- und Raumtheilung. (Regular partitioning of planes and spaces). *Abhandl. d. d. Königl. Bayer. Akad. d. Wiss., Mathemat. Physikal. Classe* **1900**. Vol. 20. P. 467–588.

*Fedorow E.v.* Reticuläre Dichtigkeit und erfahrungsgemässe Bestimmung der Krystalstruktur. (Reticular density and empirical crystal structure determination). *Z. Kryst.* **1902**. Vol. 36. P. 209–233.

*Fedorow E.v.* Ueber die Anwendung des Dreispitzzirkels für krystallographische Zwecke. (About the application of a 3-point divider). *Z. Kryst.* **1903**. Vol. 37. P. 138–142.

*Fedorow E.v.* Notiz, betreffend die Krystallisation des Calaverit. (Note concerning the crystallization of Calaverite). *Z. Kryst.* **1903a**. Vol. 37. P. 611–618.

*Fedorow E.v.* Das Sphärotrigonomet. Ein Instrument zur genauen graphischen Lösung von Aufgaben der krystallographischen und sphärischen Trigonometrie. (The spherico-trigonomet. An instrument enabling exact graphical solutions of problems in crystallographic and spherical trigonometry). *Z. Kryst.* **1909**. Vol. 46. P. 197–202.

*Fedorow E.v.* Die größtmögliche Vereinfachung bei zonalen Berechnungen und krystallographischen Berechnungen im allgemeinen. (The utmost simplification of zonal calculations and crystallographic calculations in general). *Z. Kryst.* **1909a**. Vol. 46. P. 202–210. *Fedorow E.v.* Wie soll man die Fehler der Excentrität bei billigen Universalgoniometern vermeiden? (How can errors of excentricity be avoided with cheap universal goniometers?) *Z. Kryst.* **1909b**. Vol. 46. P. 215.

*Fedorow E.v.* Die Praxis in der krystallochemischen Analyse und die Abfassung der Tabellen für dieselbe. (The practice of crystallochemical analysis and the composition of tables for it). *Z. Kryst.* **1912**. Vol. 50. P. 513–576.

*Fedorow E.v.* Die projicirenden Kegel der stereographischen Projectionen. *Z. Kryst.* **1914**. Vol. 53. P. 179–181.

Fedorow E.v. Weitere krystallochemische Belehrungen an der Hand der Tabellen zur krystallochemischen Analyse. *Z. Kryst.* **1914a**. Vol. 53. P. 337–388.

Fedorow E.v., Artemiev D., Barker T.T., Orelkin B., Sokolov W. Das Krystallreich. Tabellen zur krystallochemischen Analyse. Mit Atlas; (The crystal realm. Tables for crystallochemical analysis. With Atlas.) *Proc. Rus. Akad. Sci., Phys.-Mat. Dep.* **1920**. Vol. 36. P. 1–1050.

Filatov S.K. Symmetry statistics of mineral species in various thermodynamic conditions. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)* **2019**. N 5. 1–13.

Filatov S.K., Urusov V.S. (Eds.) Dedicated to the 300th Anniversary of St. Petersburg and the 150th Anniversary of E. S. Fedorov. X-ray Diffraction and Spectroscopy of Minerals. *Proc. XV International Meeting on Crystal Chemistry on X-ray Diffraction & Crystal Chemistry of Minerals*: Saint Petersburg, Russia, 15–19 September **2003**.

Friedrich W., Knipping P., Laue M. Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen. (Interference patterns with X-rays). *Sitzungsber. Kgl. Bayer. Akad. Wiss.* **1912**. Vol. 14. P. 303–322.

Fritsch R. Schoenflies, Arthur. In *Neue Deutsche Biographie (NDB)*. Band 23. Duncker & Humblot Verlag: Berlin, Germany, **2007**.

Galiulin R.V. To the 150th anniversary of the birth of Evgraf Stepanovich Fedorov (1853–1919). Irregularities in the fate of the theory of regularity. *Crystall. Rep.* **2003**. N 6. P. 899–913.

Goldschmidt V. Goniometer mit zwei Kreisen. (A two-circle goniometer.) *Z. Kryst.* **1893**. Vol. 21. P. 210–232.

Goldschmidt V., Palache C.H., Peacock M. Über Calaverit. (About Calaverite). *Neues Jahrb. Miner.* **1931**. Vol. 63. P. 1–58.

Groth P.V. Physikalische Krystallographie und Einleitung in die Kenntniss der wichtigsten Substanzen. (Physical Crystallography and Introduction to the Knowledge of Important Substances). Engelmann: Leipzig, Germany, **1905**.

Heesch H. Zur Strukturtheorie der ebenen Symmetriegruppen. (Concerning the structure theory of plane symmetry groups). *Z. Krist.* **1929**. Vol. 71. P. 95–102.

Heesch H. Zur systematischen Strukturtheorie. III. Über die vierdimensionalen Gruppen des dreidimensionalen Raumes. (Concerning the systematic structure theory. III. About the four-dimensional groups of three-dimensional space). *Z. Krist.* **1930**. Vol. 73. P. 325–345.

Heesch H. Zur systematischen Strukturtheorie. IV. Über die Symmetrie zweiter Art in Kontinuen und Semidiskontinuen. (On the systematic structure theory. IV. About the symmetry of second kind in continua and semicontinua). *Z. Krist.* **1930a**. Vol. 73. P. 346–356.

Hermann C. Zur systematischen Strukturtheorie. III. Ketten- und Netzgruppen. (Concerning the systematic structure theory. III. Chain and net groups). *Z. Krist.* **1929**. Vol. 69. P. 250–270.

Hilton H. A comparison of various notations employed in “Theories of Crystal-structure,” and a revision of the 230 groups of movements. *Phil. Mag. Ser 6*. **1902**. Vol. 3. P. 203–212.

Janner A., Dam B. The morphology of calaverite (AuTe<sub>2</sub>) from data of 1931. Solution of an old problem of rational indices. *Acta Cryst.* **1989**. Vol. A45. P. 115–123.

Janssen T., Janner A. Aperiodic crystals and superspace concepts. *Acta Cryst.* **2014**. Vol. B70. P. 617–651.

Jones O. The Grammar of Ornament. A Visual Reference of Form and Colour in Architecture and the Decorative Arts. Day & Son: London, UK, **1856**.

Kaemmel T.H. Arthur Moritz Schoenflies 2003, 150. Geburtstag und 75. Todestag. (Arthur Moritz Schoenflies 2003, 150th anniversary of birth and 75th anniversary of death). *Dtsch. Mineral. Ges. DMG-Forum*, **2004**. Vol. 87. P. 1–5.

Kopçik V.A. Shubnikov groups. Manual of Symmetry and Physical Properties of Crystalline Structures. Moscow: MSU, **1966**. 724 p. (in Russian).

Kraus E.H. Paul Heinrich von Groth. *Science*. **1926**. Vol. 67. P. 150–152.

Kubbinga H. Crystallography from Haüy to Laue: Controversies on the molecular and atomistic nature of solids. *Z. Krist.* **2012**. V. 227. P. 1–26.

Laue M. Eine quantitative Prüfung der Theorie für die Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. (A quantitative check of the theory of interference patterns with X-rays). *Sitzungsber. Kgl. Bayer. Akad. Wiss.* **1912**. Vol. 14. P. 363–373.

Meniaïlov A. Fyodorov (or Fedorov). Evgraf Stepanovich. In *Complete Dictionary of Scientific Biography*; Charles Scribner’s Sons: New York, NY, USA, **2008**.

Menzer G. Paul von Groth. In *Neue Deutsche Biographie (NDB)*. Band 7. Duncker & Humblot: Berlin, Germany, **1966**.

Mitscherlich E. Über die Kristallisation der Salze, in denen das Metall der Basis mit zwei Proportionen Sauerstoff verbunden ist. (About the crystallization of salts, the base metal of which is bound to two proportions of oxygen). *Abh. kgl. Akad. Wiss. Berlin*, **1818–1819**, P. 427–437, Georg Reimer, Berlin, **1820**.

*Niggli P.* Die Flächensymmetrien homogener Diskontinuen. (Plane symmetries of homogeneous discontinua.) *Z. Krist.* **1924**. Vol. 60. P. 283–298.

*Niggli P.* Die regelmäßige Punktverteilung längs einer Geraden in einer Ebene. Symmetrie von Bordürenmuster. (The regular distribution of points along a straight line in a plane. Symmetry of patterns of bordures). *Z. Krist.* **1926**. Vol. 63. P. 255–274.

*Nowacki W.* Bemerkungen zur Geschichte der Raumgruppen-Symbole von Fedorow, Schoenflies und Hermann-Mauguin. (Remarks on the history of the space-group symbols of Fedorow, Schoenflies and Hermann-Mauguin). *Z. Krist.* **1972**. Vol. 135. P. 145–178.

*Paufler P.* William Barlow's early publications in the 'Zeitschrift für Kristallographie und Mineralogie' and their influence on crystal structure research. *Z. Krist.* **2019**. Vol. 234. P. 769–785.

*Pólya G.* Über die Analogie der Kristallsymmetrie in der Ebene. (About the analogy of crystal symmetry in the plane). *Z. Krist.* **1924**. Vol. 60. P. 278–282.

*Schoenflies A.* Über Gruppen von Bewegungen; I. und 2. Abh. (About groups of motion). *Math. Ann.* **1887**. Vol. 28. P. 319–342.

*Schoenflies A.* Beitrag zur Theorie der Krystalstruktur. (Contribution to the theory of crystal structure.) *Nachr. Königl. Gesell. Wiss. Göttingen* **1888**. Vol. 17. P. 483–501.

*Schoenflies A.* Ueber reguläre Gebietstheilungen des Raumes. (About regular domain-partitioning of space.) *Nachr. Königl. Gesell. Wiss. Göttingen*, **1888a**. Vol. 9. P. 223–237.

*Schoenflies A.* Über Gruppen der Transformation des Raumes in sich. (About groups of transformations of space into itself). *Math. Ann.* **1889**. Vol. 34. P. 172–203.

*Schoenflies A.* Über das gegenseitige Verhältniß der Theorien über die Structur der Krystalle. (About the interrelation of theories on the structure of crystals). *Nachr. Königl. Gesell. Wiss. Göttingen*, **1890**. Vol. 6. P. 239–250.

*Schoenflies A.* Krystalssysteme und Krystalstruktur (Crystal systems and crystal structure); B. G. Teubner: Leipzig, Germany, **1891**.

*Schoenflies A.* Bemerkung zu dem Artikel des Herrn E. von Fedorow, die Zusammenstellung seiner kristallographischen Resultate und der meinigen betreffend. (Remark on the article of Mr. E. von Fedorow, related to his crystallographic results and to mine). *Z. Kryst.* **1892**. Vol. 20. P. 259–262.

*Scholz E.* Symmetrie, Gruppe, Dualität (Symmetry, Group, Duality). Deutscher Verlag der Wissenschaften: Berlin, Germany, **1989**.

*Schubnikow A.* Über die Symmetrie des Kontinuums. (About the symmetry of the continuum). *Z. Krist.* **1930**. Vol. 72. P. 272–290.

*Senchal M., Galiulin R.V.* An introduction to the theory of figures: The geometry of E. S. Fedorov. *Struct. Topol.* **1984**. Vol. 10. P. 5–22.

*Shafranovskij I.I., Belov N.V.* In Memoriam: E. S. Fedorov 1853–1919, In Fifty Years of X-ray Diffraction. Ed. By Ewald P.P. International Union of Crystallography: Utrecht, The Netherlands. **1962**. P. 341–350.

*Shafranovskij I.I., Frank-Kameneckij V.A., Dolivo-Dobrovolskaja E.M.* (Eds.) Evgraf Stepanovich Fedorov, Correspondence. Unpublished and Little-Known Works. Nauchnoe nasledstvo. Vol. 16. Leningrad: Nauka, **1991**. 318 p. (in Russian).

*Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W.* Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. *Phys. Rev. Lett.* **1984**. Vol. 20. P. 1951–1953.

*Shubnikov A.V.* Latest in Symmetry Teaching and its Application. Moscow: USSR Acad. Sci., **1945** (in Russian).

*Shubnikov A.V.* Symmetry and Antisymmetry of finite Figures. Moscow: USSR Acad. Sci., **1951**.

*Shubnikov A.V.* Antisymmetry of textures. *Kristallografija*. **1958**. N 3. P. 263–268 (in Russian).

*Shubnikov A.V.* Complete systematics of black-white point groups. *Kristallografija*. **1961**. N 6. P. 490–495 (in Russian).

*Shubnikov A.V., Kopicik V.A.* Symmetry in Science and Art. Moscow: Nauka, **1972** (in Russian).

*Shull C.G., Smart J.S.* Detection of antiferromagnetism by neutron diffraction. *Phys. Rev.* **1949**. Vol. 76. P. 1256–1257.

*Smith G.F.H.* Ueber das bemerkenswerthe Problem der Entwicklung der Krystallformen des Calaverit. (About the remarkable problem of the evolution of crystal forms of Calaverite). *Z. Kryst.* **1903**. Vol. 37. P. 209–234.

*Sohncke L.* Die regelmässigen ebenen Punktsysteme von unbegrenzter Ausdehnung. (The regular plane point systems of infinite extension.) *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, **1874**. Vol. 77. P. 47–101.

*Sohncke L.* Entwicklung einer Theorie der Krystalstruktur (Development of a Theory of Crystal Structure.) Teubner: Leipzig, Germany, **1879**.

*Sokolow W.J., Artemiew D.N., Fedorow E.S.* Direkte tabellarische Ablesung der Netzdichtigkeiten der Krystallflächen. (The direct tabulated reading of net densities of crystal faces). *Z. Kryst.* **1911**. Vol. 48. P. 377–401.

*Steinmetz H., Weber L.* Paul v. Groth. Der Gründer der Zeitschrift für Kristallographie (1843–1927). (Paul v. Groth. Founder of Zeitschrift für Kristallographie (1843–1927)). *Z. Kristallogr.* **1939**. Vol. 100. P. 5–46.

*Stensen N.* De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus. Stellae: Florentiae, 1669. Vorläufer einer Dissertation über feste Körper, die innerhalb anderer fester Körper von Natur aus eingeschlossen sind. (Precursor of a thesis on solids, which are naturally enclosed in other solids.) In Ostwald's Klassiker der Exakten Wissenschaften 209; Akad. Verlagsges: Leipzig, Germany, **1923**.

*Streltsov S.V., Roizen V.V., Ushakov A.V., Oganov A.R., Khomskii D.I.* The puzzle of incommensurate crystal structure of calaverite AuTe<sub>2</sub> and predicted stability of novel AuTe compound. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **2018**. Vol. 115. P. 9945–9950.

*Tavger B.A., Zaitsev V.M.* Magnetic symmetry of crystals. *Sov. Phys. J. Exp. Theor. Phys.* **1956**. N 3. P. 430–436.

*Weber L.* Die Symmetrie homogener ebener Punktsysteme. (The symmetry of homogeneous plane point systems). *Z. Krist.* **1929**. Vol. 70. P. 309–327.

*Wondratschek H.* Introduction to space-group symmetry. In: International Tables for Crystallography. Vol. A: Space-Group Symmetry, 5th ed. Ed. By T.H. Hahn. Kluwer Academic Publishing: Dordrecht, The Netherlands, **2002**. P. 719–740.

*Zamorzaev A.M.* Generalization of Fedorov groups. *Kristallografija.* **1957**. N 2. P. 15–20 (*in Russian*).