

Из истории естествознания
From the History of Science

DOI: 10.31857/S020596060008426-0

О ПРЕДМЕТЕ, ИСТОРИИ И СТАТУСЕ КРИСТАЛЛОХИМИИ

СМОЛЕГОВСКИЙ Александр Михайлович — Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН; Россия, 125315, Москва, ул. Балтийская, д.14; E-mail: smolegovskiy@mail.ru

© А. М. Смолеговский

В статье рассмотрено становление предмета кристаллохимии, ее краткая история и современный статус. Указывается, что эволюция дефиниции предмета кристаллохимии прошла три стадии, для каждой из которых было характерно постулирование необходимости изучения следующих зависимостей: 1) между внешней формой кристалла и его химическим составом; 2) между структурой и химическим составом; 3) между структурой, химическим составом и свойствами. В свою очередь, в развитии кристаллохимии в целом можно выделить два периода (дорентгеноструктурный и рентгеноструктурный), в первом из которых была принята первая дефиниция, а во втором — соответственно вторая и потом третья. Также проанализирован вклад в развитие кристаллохимии ряда ученых, в первую очередь У. Г. и У. Л. Брэггов, и связь кристаллохимии с другими науками.

Ключевые слова: кристаллохимия, эволюция, дефиниция, кристаллическая структура, физико-химические свойства.

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2019 г.

**ON THE SUBJECT, HISTORY, AND PRESENT STATUS
OF CRYSTAL CHEMISTRY**

SMOLEGOVSKIY Alexander Mikhailovich — S. I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences; Ul. Baltiyskaya, 14, Moscow, 125315, Russia; E-mail: smolegovskiy@mail.ru

© А. М. Smolegovskiy

Abstract: This paper reviews the making of the subject of crystal chemistry, its brief history and present status. The evolution of the definition of crystal chemistry as a subject has passed through three stages. For each of these stages, it was postulated that the following correlations needed to be studied, respectively: (1) the correlation between the crystal's external shape and chemical composition, (2) between the crystal's structure and chemical composition, and (3) between the structure, chemical composition, and properties. In turn, two periods, pre-X-ray diffraction era and the era of X-ray diffraction, can be identified in the development of crystal chemistry in general. The first definition of crystal chemistry was adopted during the first period and the second and third definitions were adopted during the second period. The paper also analyzes the contributions of a number scientists, W. L. Bragg and W. H. Bragg above all, to the development of crystal chemistry as well as crystal chemistry's connections to other sciences.

Keywords: crystal chemistry, evolution, definition, crystal structure, physicochemical properties.

For citation: Smolegovskiy, A. M. (2020) О предмете, истории и статусе кристаллохимии [On the Subject, History, and Present Status of Crystal Chemistry], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 41, no. 1, pp. 57–68, DOI: 10.31857/S020596060008426-0

Предметом кристаллохимии является изучение взаимосвязи между химическим составом и пространственным расположением атомов в кристалле, с одной стороны, и комплексом его физических, химических, физико-химических и биологических свойств, с другой. Употребление слова «взаимосвязь», на первый взгляд, неправомерно, так как именно структура обуславливает существование специфических свойств кристалла, а не наоборот. Однако для современных кристаллохимических исследований характерно использование и обратной связи, т. е. синтез кристаллов со структурой, обеспечивающей наличие ценных в практическом отношении физических свойств, на базе уже известных закономерностей системы «структура – свойства». Иными словами, прежде всего определяют пространственное расположение конкретных атомов в определенном кристалле, а затем исследуют корреляции между структурой соединения и его практически важными свойствами.

Такое понимание задач кристаллохимии является итогом эволюции взглядов на ее предмет с начала XIX в. и до настоящего времени. Схематично эта эволюция может быть представлена в виде последовательной смены трех дефиниций этой науки, для каждой из которых было характерно постулирование необходимости изучения следующих зависимостей: 1) между внешней формой кристалла и его химическим составом; 2) между структурой и химическим составом; 3) между структурой, химическим составом и свойствами.

В развитии кристаллохимии можно выделить два периода, в первом из которых была принята первая дефиниция, а во втором — соответственно вторая и потом третья. Первый (дорентгеноструктурный) период завершился в 1913 г., когда У. Г. и У. Л. Брэггами (отцом и сыном) был создан метод рентгеноструктурного анализа (РСА), основанный на открытом в 1912 г. М. фон Лауэ, В. Фридрихом и П. Книппингом явлении дифракции рентгеновских лучей на кристаллах ¹.

Второй (рентгеноструктурный) период продолжается вплоть до настоящего времени. Он, в свою очередь, может быть разделен на три подпериода: 1913–1919 гг. (переходный), с 1920 г. по конец 1960-х гг., с начала 1970-х гг. по настоящее время. Менее строгим, но, по нашему мнению, целесообразным может быть обособление четвертого подпериода — со второй половины 1980-х гг. по настоящее время. Этот интервал характерен постепенным пополнением традиционного материала структурного исследования кристаллов, позволяющего определить координаты и типы атомов, а следовательно, длины связей, валентные углы или другую структурную информацию, которую можно использовать для поиска корреляций «структура — свойство». Речь идет об определении распределения электронной плотности в кристаллах, которое обуславливает их свойства (в соответствии с теоремой Хоэнберга — Кона ², сформулированной в 1964 г., свойства основного состояния являются функционалом электронной плотности) ³. Фактически теорема Хоэнберга — Кона означает, что выражение может быть обращено, т. е. по заданной плотности частиц в основном состоянии можно найти соответствующую волновую функцию этого состояния. Необходимо помнить, что конкретную формулу теоремы (аналитическую) доказать невозможно.

Заметим, что в русскоязычной литературе определение распределения электронной плотности называют прецизионными исследованиями. Российскими первопроходцами в данной области являются член-корреспондент РАН М. Ю. Антипин, профессора В. Г. Цирельсон, А. А. Корлюков и др. ⁴ Поскольку метод позволяет исследовать

¹ См. об этом: *Храмов Ю. А.* Физики. М.: Наука, 1983. С. 369.

² Пьер Хоэнберг (1934–2017) — французско-американский физик-теоретик, специалист по физике конденсированного состояния, неравновесным явлениям, статистической физике, квантовой механике и философии науки. Известен как один из разработчиков функционала плотности (см. статью: *Хоэнберг П.* Дальний порядок при сверхпроводящем переходе // *Успехи физических наук.* 1970. Т. 102. С. 239–246). Вальтер Кон — американский физик-теоретик (1923–2016).

³ См.: *Цирельсон В. Г.* Квантовая химия. Молекулы, молекулярные системы и твердые тела. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. С. 116.

⁴ См.: *Цирельсон В. Г., Антипин М. Ю.* Новые представления о химической связи по данным распределения электронной плотности // *Проблемы кристаллохимии* / Ред. М. А. Порай-Кошиц. М.: Наука, 1989. С. 119–160; *Цирельсон В. Г.* Функция электронной плотности в кристаллохимии: методы определения и интерпретация // *Итоги науки и техники. Серия: Кристаллохимия.* М.: ВИНТИ, 1986. Т. 20: Электронная кристаллохимия. С. 3–123.

структуру и спектр соединения, то нередко используют общий термин — рентгенодифракционный анализ.

Изначально попытки представить внутреннее строение кристаллов предпринимали Д. Кардано, И. Кеплер, Р. Гук (XVI–XVII вв.), связать строение кристаллов с их химическим составом пытались М. В. Ломоносов и Т. Бергман (XVIII в.)⁵.

«Первым важным положением кристаллохимии» назвал В. М. Гольдшмидт закон Гаюи, открытый в 1801 г., в соответствии с которым строение и форма кристалла зависят только от формы и распределения составляющих его частей⁶. При этом Гаюи полагал для всех кристаллических веществ существование лишь одной, первичной, формы, из которой, как вторичные образования, уже могут быть выведены все остальные. Следующими важнейшими шагами в развитии кристаллохимии в дорентгеноструктурный период были: указание И. Н. Фукса (1815) на существование «замещающих составных частей» в кристалле; открытие Ф. С. Бёданом (1818) явления образования смешанных кристаллов, Э. Мичерлихом (1818–1822) — явлений изоморфизма и полиморфизма, Ж. Ш. Г. Мариньяком (1858) — изоморфизма фтора и кислорода, Л. Пастером (1848, 1860) — энантиоморфизма, обусловленного строением кристалла; интерпретация Г. Чермаком (1865) состава полевых шпатов на основе изоморфизма атомов.

Далее последовало открытие П. Гротом (1870) морфотропии; введение Г. Стони (1885) представления о формульной единице, или «макромолекуле», кристалла, а Г. Вант-Гоффом — (1890) понятия «твёрдого раствора»; вывод Е. С. Федоровым (1890) и А. Шёнфлисом (1891) 230 пространственных групп; развитие А. Арцруни⁷ представления об изоморфных рядах (1893); введение Ф. Беке, Ф. Е. Таттоном и В. Мутманом (1893–1894) понятия о «топических осях»; открытие Ф. Ринне (1894–1897) явления изотипии и введение Г. Линком представления об «эвтропических рядах»; выявление закономерностей в области химической кристаллографии П. Гротом, Б. Госнером и В. Мутманом (с 1906 г.); введение Е. С. Федоровым (1907) представления о «кристаллографической гомологии»; открытие В. И. Вернадским (1909) изоморфных рядов; введение Г. Баумгауэром (1915) понятия и термина «политипия»⁸.

⁵ Подробнее об этом см.: *Шафрановский И. И.* История кристаллографии. Л.: Наука, 1978. Т. 1, 1980. Т. 2.

⁶ *Гольдшмидт В. М.* Кристаллохимия. Л.: ОНТИ Химтеорет, 1937. С. 8.

⁷ Андреас Арцруни (по-русски — Андрей Еремеевич, Андреас Еремеевич (1847–1898) — один из основоположников геохимии. «Физическая химия кристаллов» — первое в этой области произведение. Капитальное издание П. Грота вышло позднее. В. И. Вернадский назвал книгу Арцруни «монументальным памятником совершенно исключительного владения печатным материалом». Книга опубликована в 1893 г. в Брауншвейге на немецком языке и включает 365 с. (*Arzruni, A.* *Physikalische Chemie der Krystalle.* Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn, 1893).

⁸ Подробнее об этом см.: *Шафрановский.* История кристаллографии...

Выделение переходного этапа (подпериод 1913–1919 гг.) в рамках рентгеноструктурного периода обусловлено тем, что в этот промежуток были опубликованы монография Брэггов «Рентгеновские лучи и строение кристаллов»⁹, статьи Е. С. Федорова и Г. В. Вульфа с обсуждением итогов первых структурных исследований минералов¹⁰, работы П. Ниггли и П. Пфейффера¹¹, в которых развивались представления о координационном числе применительно к неорганическим кристаллам, и был накоплен массив структурных данных, позволивших сделать первые кристаллохимические обобщения.

В эти же годы кристаллохимия вырабатывала свой язык (напомним, что в первых публикациях Брэггов не использовались такие термины, как «постоянная решетки», «точечная симметрия», «координаты атомов»). У исследователей вызревало понимание необходимости использования в структурном анализе теоретического аппарата пространственных групп, созданного в 1890–1891 гг.

1920 г. стал знаковым в истории кристаллохимии благодаря появлению статьи У. Л. Брэгга¹², признанной крупнейшими учеными «датой» рождения этой науки. 50–60 гг. прошлого столетия были отмечены «революцией в кристаллографии» (по У. К. Гамильтону¹³) или характеризовались как «эпоха романтического рентгеноструктурного анализа» (по М. А. Порай-Кошицу¹⁴). Они отличались широким применением автоматических дифрактометров и компьютеров, вследствие чего на несколько порядков увеличилась скорость и повысилась прецизионность рентгеноструктурных определений, а

⁹ Bragg, W. H., Bragg, W. L. X-Rays and Crystal Structure. London: G. Bell and Sons, 1915.

¹⁰ Федоров Е. С. Первое констатирование опытным путем асимметричной правильной системы // Записки Горного института. 1914. Т. 5. Вып. 1. С. 54–56; Федоров Е. С. О строении кристаллов алмаза по Брэггу // Записки Горного института. 1914. Т. 5. Вып. 1. С. 68; Федоров Е. С. Первые шаги в деле распознавания расположения атомов в кристаллах // Природа. 1915. № 3. С. 339–350; Федоров Е. С. Результаты первой стадии экспериментального исследования структуры кристаллов // Известия Императорской академии наук. Серия 6. 1916. Т. 10. № 5. С. 359–389; Федоров Е. С. Основной закон кристаллохимии // Известия Императорской академии наук. Серия 6. 1916. Т. 10. № 6. С. 435–454; Вульф Г. В. Предисловие к русскому переводу // Брэгг У. Х., Брэгг У. Л. Рентгеновские лучи и строение кристаллов. М.: Космос, 1916. С. 1–10; Вульф Г. В. Брэгги // Природа. 1916. № 7–8. С. 887–891.

¹¹ Pfeiffer, P. Die Kristalle als Molekülverbindungen // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 1915. Bd. 92. S. 376–380; Niggli, P. Die Struktur der Kristalle // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 1916. Bd. 94. S. 207–216.

¹² Bragg, W. L. The Arrangement of Atoms in Crystals // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 6. 1920. Vol. 40. Iss. 236. P. 169–189.

¹³ Гамильтон У. К. Революция в кристаллографии // Успехи химии. 1972. Т. 41. Вып. 3. С. 566–583.

¹⁴ Порай-Кошиц М. А. Основы структурного анализа химических соединений. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1989. С. 3.

следовательно, качественно преобразовались все области кристаллохимических исследований.

Необходимость обособления подпериода, начинающегося со второй половины 1980-х гг., связана с рождением принципиально нового направления — электронной кристаллохимии. Его содержанием является прецизионное определение распределения электронной плотности. Исследования в области электронной кристаллохимии не только способствуют пониманию уже известных кристаллических структур, но и существенно углубляют представление о химической связи атомов в кристалле.

Следует заметить, что существование дорентгеноструктурного периода развития кристаллохимии признается далеко не всеми. Так, Р. К. Эвансом высказана точка зрения о возникновении кристаллохимии в 1920 г.¹⁵, по мнению И. Земана, современная кристаллохимия, возникшая в 20-х гг. XX в., — наука еще очень молодая¹⁶. Аналогичную позицию занимает и В. А. Франк-Каменецкий:

Основные положения кристаллохимии как науки о связях, существующих между расположением атомов в кристаллах, их химическим составом и свойствами, были установлены еще в 1920-х годах, в основном работами В. Г. Брэгга, У. Л. Брэгга, В. М. Гольдшмидта и их учеников¹⁷.

Но в русле историко-химического подхода противоречие между взглядами Эванса, Земана, Франк-Каменецкого и тех, кто относит дату рождения кристаллохимии к началу XIX в., снимается. Ибо ясно, что в дорентгеноструктурный период изучалось взаимоотношение между кристаллической формой и химическим составом, тогда как в эпоху рентгеноструктурных исследований выяснялась зависимость внутреннего строения кристалла от его химического состава.

Иными словами, к 1920-м гг., как справедливо указывают Эванс и др., относится возникновение не кристаллохимии вообще, а структурной кристаллохимии. Впрочем, наш подход не является оригинальным. Такое же мнение высказал Гольдшмидт в 1934 г.¹⁸ Однако оно осталось незамеченным.

Необходимо сказать несколько слов об истории появления самого термина «кристаллохимия». Впервые он встречается в книге немецкого химика-минералога К. Ф. Раммельсберга «Пособие по кристалловедению, или основы кристаллографии, кристаллофизики и кристаллохимии», опубликованной в 1852 г.¹⁹ На русском языке этот

¹⁵ Эванс Р. К. Введение в кристаллохимию. М.; Л.: Госхимиздат, 1948. С. 12.

¹⁶ Земан И. Кристаллохимия. М.: Мир, 1969. С. 9.

¹⁷ Франк-Каменецкий В. А. Предисловие редактора перевода // Пенкаля Т. Очерки кристаллохимии. Л.: Химия, 1974. С. 6.

¹⁸ Goldschmidt, V. M. Kristallchemie // Handwörterbuch der Naturwissenschaften, 2 Aufl. Jena: G. Fischer, 1934. Bd. 5. S. 1128–1154.

¹⁹ Rammelsberg, K. F. Lehrbuch der Kristallkunde, Order, Anfangs Grunde der Kristallphysik und Kristallochemie. Berlin: P. Jeanreaaud, 1852.

термин, вероятно, впервые появился в 1895 г. в статье приват-доцента (впоследствии профессора Петербургского университета, члена-корреспондента АН СССР) П. А. Земятченского «Кристаллология»²⁰, помещенной в «Энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона». В ней, в частности, сказано: «Наконец, кристаллохимия обнимает химические явления в них (кристаллах. — А. С.)»²¹. Здесь, как и в монографии Раммельсберга, слово «кристаллохимия» служит синонимом термина «химическая кристаллография», поскольку обозначенное им понятие вкупе с двумя другими (математической и физической кристаллографией) рассматривается в качестве подраздела кристаллологии.

В химической литературе 1910-х гг. в России и за рубежом получил относительно широкое распространение термин «кристаллохимический» (обычно со словом «анализ», см., например, работу Федорова²²). Но он не относится к структурной кристаллохимии, а характеризует направление в минералогии, пиком развития которого по праву считается знаменитый «Кристаллохимический анализ» Федорова²³. В этом издании рассмотрен метод определения минералов на основе морфологических данных и созданной Федоровым геометрической теории строения кристаллов.

Первый раз в значении, близком к современному, термин «кристаллохимия» использовался Федоровым в 1916 г. в статье «Основной закон кристаллохимии»²⁴. Просмотр работ за соответствующие годы, отраженных в известных справочниках²⁵, показал, что термин «кристаллохимия» вплоть до середины 1930-х гг. почти не упоминался. Вновь он стал использоваться только после появления в 1934–1939 гг. серии монографий по кристаллохимии²⁶. Распространению этого термина в нашей стране способствовал как перевод названных книг, так и появление в 1954 г. первого отечественного курса — «Введение в кристаллохимию» Г. Б. Бокия²⁷.

Вопрос о статусе кристаллохимии включает два аспекта — место, занимаемое ею в системе естественных наук, и отношение к ней как

²⁰ Земятченский П. А. Кристаллология // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. СПб.: Типо-литография И. А. Ефрона, 1895. Т. 16а. С. 751.

²¹ Там же.

²² Fedorow, E. S. Das Krystallreich. Tabellen zur krystallochemischen Analyse. Petrograd: Academie des sciences de Russie, 1920.

²³ Федоров Е. С. Кристаллохимический анализ. СПб.: Образование, 1914.

²⁴ Федоров Е. С. Основной закон кристаллохимии // Известия Императорской академии наук. Серия 6. 1916. Т. 10. № 6. С. 435–454.

²⁵ Strukturbericht. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1931. Bd. 1; Wyckoff, R. W. G. The Structure of Crystals. New York: The Chemical Catalog Co., 1924.

²⁶ Hassel, O. Kristalchemie. Dresden; Leipzig: Th. Steinkopff, 1934; Bragg, W. H., Bragg, L. The Crystalline State. London: G. Bell and Sons, 1933. Vol. 1: A General Survey; Stillwell, Ch. W. Crystal Chemistry. New York; London: McGraw Hill Book Co., 1938; Evans, R. C. An Introduction to Crystal Chemistry. London: Cambridge University Press, 1939; Бокий Г. Б. Введение в кристаллохимию. М.: Изд-во МГУ, 1954.

²⁷ Бокий. Введение в кристаллохимию...

к самостоятельной дисциплине в «организационном плане», т. е. со стороны Комитета международных союзов и в рамках государственной научной политики.

Попытку соотнести кристаллохимию с системой «старых» дисциплин одним из первых предпринял в 1934 г. А. Е. Ферсман. Он предложил следующий «исторический ряд последовательного развития идей: минералогия — кристаллография — кристаллохимия — геохимия»²⁸. Также Ферсман отметил вклад Гольдшмидта в анализ взаимосвязи между кристаллохимией и геохимией. В наше время эти представления существенно углублены трудами патриарха отечественной кристаллохимии академика Н. В. Белова²⁹.

В книге Дж. Бернала «Наука и промышленность в XIX столетии»³⁰ показана взаимосвязь развития кристаллохимии, кристаллофизики, химии и физики в 1900–1950 гг. Предложенная автором схема, решая частную задачу (проследить влияние работ Л. Пастера на развитие перечисленных наук), удачно иллюстрирует «разветвленность в изображении системы наук», отмеченную Б. М. Кедровым³¹.

Представление о кристаллохимии как о теоретической базе современного материаловедения встречается в вышедшей в 1964 г. в США книге Э. Парте «Кристаллохимия тетраэдрических структур»³².

Интересная схема соотношения между кристаллохимией и другими науками представлена Б. К. Вайнштейном в первом томе «Современной кристаллографии»³³ и статье «Кристаллография сегодня»³⁴. Его картина взаимосвязи наук ассоциируется со схемой

²⁸ Ферсман А. Е. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955, Т. 3 С. 35. Не трудно заметить, что «ряд Ферсмана» базируется на той же теоретической предпосылке, что и известная последовательность Энгельса математика — механика — физика — химия — биология — история, т. е. отражает «процесс восхождения от низшего к высшему» (Кедров Б. М. О современной классификации наук // Вопросы философии. 1980. № 10. С. 89).

²⁹ Белов Н. В. Геохимические аккумуляторы // Труды Института кристаллографии АН СССР. 1952. Вып. 7. С. 73–80; Белов Н. В. Кристаллохимия основного процесса кристаллизации магмы // Геохимия редких элементов в связи с проблемой петрогенезиса. Труды Геохимического симпозиума (20–24 декабря 1957 г.) / Ред. А. П. Виноградов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 95–100; Белов Н. В. Магматическая дифференциация в кристаллохимическом аспекте // Минералогический сборник Львовского государственного университета. 1974. № 28. Вып. 4. С. 4–6; Белов Н. В. Вилка Боуэна в кристаллохимическом освещении // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1981. Ч. 110. Вып. 1. С. 3–4.

³⁰ Bernal, J. D. Science and Industry in the Nineteenth Century. London: Routledge and Kegan Paul, 1953.

³¹ Кедров. О современной классификации наук... С. 89.

³² Parthe, E. Crystal Chemistry of Tetrahedral Structures. New York; London: Gordon and Breach, 1964.

³³ Вайнштейн Б. К. Симметрия кристаллов. Методы структурной кристаллографии // Современная кристаллография (в четырех томах) / Ред. Б. К. Вайнштейн, А. А. Чернов, Л. А. Шувалов. М.: Наука, 1979. Т. 1. С. 7.

³⁴ Вайнштейн Б. К. Кристаллография сегодня // Кристаллография. 1982. Т. 27. № 6. С. 1045–1055.

их объединения «по субстратному признаку», т. е. по принципу отношения к одному и тому же объекту (в данном случае к кристаллу). При несомненной прогрессивности такого подхода он, очевидно, все же нивелирует специфику кристаллохимии, «скрывая» роль ее химического аспекта. Трудно также согласиться с вычленением из рамок (в буквальном смысле) кристаллохимии исследований по идеальной и реальной структуре кристаллов и с отсутствием связи между кристаллохимией и неорганическим материаловедением.

Заслуживает внимания и схема контактов кристаллохимии с другими химическими разделами, предложенная П. М. Зорким³⁵. Отражая мысль о двоякой (прикладной и фундаментальной) функции кристаллохимии в системе химических наук, она удачно, на наш взгляд, выделяет специфику рентгеноструктурного анализа.

Взаимосвязь кристаллохимии с различными областями минералогии и изучением физических и химических свойств объектов отражена в статье Ч. Т. Прюита «Кристаллохимия: прошлое, настоящее и будущее»³⁶.

Рассмотрим другой аспект вопроса о статусе кристаллохимии. В 1948 г. был создан Международный союз кристаллографии и утвержден его печатный орган — журнал *Acta crystallographica*. В 1968 г. журнал был разделен на две серии: А — кристаллофизика, дифракция, теоретическая и общая кристаллография; В — структурная кристаллография и кристаллохимия. Таким образом, ни собственно кристаллохимического международного объединения, ни его печатного органа не существует. Однако, несмотря на это, общее число публикаций по кристаллохимии, рассеянных по разным журналам, возрастает значительно интенсивнее, чем в среднем по химии.

Так, по данным Э. А. Гилинской и Н. Н. Кочановой³⁷, коэффициент прироста научной литературы по органической кристаллохимии за 1970-е гг. составил 35 %, тогда как этот же показатель по химии равен 8–9 %. Вместе с тем если в химии удвоение объема литературы происходит за каждые 10–12 лет, то в органической кристаллохимии — за 2,5–3 года.

Отсутствуют и специализированные кристаллохимические исследовательские институты как в нашей стране, так и за рубежом. Правда, в некоторых университетах есть кафедры и лаборатории кристаллохимии, например, кафедра кристаллографии и кристаллохимии на геологическом факультете и лаборатория кристаллохимии на химическом факультете Московского государственного университета. Однако

³⁵ Зоркий П. М. Современная кристаллохимия // Химия нашими глазами / Отв. ред. Я. И. Герасимов. М.: Наука, 1981. С. 289–305.

³⁶ Prewitt, Ch. T. Crystal Chemistry: Past, Present and Future // American Mineralogist. 1985. Vol. 70. P. 444.

³⁷ Гилинская Э. А., Кочанова Н. Н. Информационный поиск в области кристаллохимии и кристаллографии // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. 1977. Т. 22. С. 398.

в целом их число невелико. Наконец, и это более чем странно для страны, ученые которой внесли крупный вклад в развитие мировой кристаллохимии, в реестре научных специальностей ВАК не числится кристаллохимия. А между тем эта наука, в которой исследуются структурные и химические превращения, физические, химические и биологические свойства веществ в кристаллическом состоянии на основании информации об их структуре и химическом составе, оказывает глубокое воздействие на развитие физики и химии твердого тела, решение проблем биологии, минералогии, геохимии и материаловедения. Именно поэтому ее относят к наукам, определяющим научно-технический прогресс.

References

- Arzruni, A. (1893) *Physikalische Chemie der Krystalle*. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn.
- Belov, N. V. (1952) Geokhimicheskie akkumulyatory [Geochemical Accumulators], *Trudy Instituta kristallografii AN SSSR*, no. 7, pp. 73–80.
- Belov, N. V. (1959) Kristallokhimiia osnovnogo protsessa kristallizatsii magmy [Crystal Chemistry of the Main Process of Magma Crystallisation], in: Vinogradov, A. P. (ed.) *Geokhimiia redkikh elementov v svyazi s problemoi petrogenezisa. Trudy Geokhimicheskogo simpoziuma (20–24 dekabria 1957 g.)* [Geochemistry of Rare Elements in Connection with the Problem of Petrogenesis. Proceedings of the Symposium on Geochemistry (December 20–24, 1957)]. Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR, pp. 95–100.
- Belov, N. V. (1974) Magmaticheskaya differentsiatsiya v kristallokhimicheskom aspekte [Magma Differentiation in Terms of Crystal Chemistry], *Mineralogicheskii sbornik L'vovskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 28, iss. 4, pp. 4–6.
- Belov, N. V. (1981) Vilka Bouena v kristallokhimicheskom osveshchenii [Bowen's Fork in the Context of Crystal Chemistry], *Zapiski Vsesoiuznogo mineralogicheskogo obshchestva*, part 110, iss. 1, pp. 3–4.
- Bernal, J. D. (1953) *Science and Industry in the Nineteenth Century*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Bokii, G. B. (1954) *Vvedenie v kristallokhimiiu* [An Introduction to Crystal Chemistry]. Moskva: Izdatel'stvo MGU.
- Bragg, W. H., and Bragg, L. (1933) *The Crystalline State*. London: G. Bell and Sons, vol. 1: A General Survey.
- Bragg, W. H., and Bragg, W. L. (1915) *X-Rays and Crystal Structure*. London: G. Bell and Sons.
- Bragg, W. L. (1920) The Arrangement of Atoms in Crystals, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Series 6, vol. 40, Iss. 236, pp. 169–189.
- Evans, R. C. (1939) *An Introduction to Crystal Chemistry*. London: Cambridge University Press.
- Evans, R. K. (Evans, R. C.) (1948) *Vvedenie v kristallokhimiiu* [An Introduction to Crystal Chemistry]. Moskva and Leningrad: Goskhimizdat.
- Fedorov, E. S. (1914) Kristallokhimicheskii analiz. Sankt-Peterburg: Obrazovanie.
- Fedorov, E. S. (1914) O stroenii kristallov almaza po Braggu [On the Structure of Diamond Crystals According to Bragg], *Zapiski Gornogo instituta*, vol. 5, no. 1, p. 68.
- Fedorov, E. S. (1914) Pervoe konstatirovanie opytным putem asimmetricheskoi pravil'noi sistemy [The First Experimental Ascertainment of an Asymmetric Regular System], *Zapiski Gornogo instituta*, vol. 5, no. 1, pp. 54–56.

- Fedorov, E. S. (1915) Pervye shagi v dele raspoznavaniia raspolzheniia atomov v kristallakh [The First Steps Towards Determining the Atom Ordering in Crystals], *Priroda*, no. 3, pp. 339–350.
- Fedorov, E. S. (1916) Osnovnoi zakon kristallokhimii [The Main Law of Crystal Chemistry], *Izvestiia Imperatorskoi akademii nauk*, seriia 6, vol. 10, no. 6, pp. 435–454.
- Fedorov, E. S. (1916) Rezul'taty pervoi stadii eksperimental'nogo issledovaniia struktury kristallov [The Results of the First Stage of the Experimental Study on Crystal Structure], *Izvestiia Imperatorskoi akademii nauk*, seriia 6, vol. 10, no. 5, pp. 359–389.
- Fedorow, E. S. (1920) *Das Krystallreich. Tabellen zur krystallochemischen Analyse*. Petrograd: Academie des sciences de Russie.
- Fersman, A. E. (1955) *Izbrannye trudy [Selected Works]*. Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR, vol. 3.
- Frank-Kamenetskii, V. A. (1974) Predislovie redaktora perevoda [Translation Editor's Preface], in: Penkalia, T. *Ocherki kristallokhimii [Essays on Crystal Chemistry]*. Leningrad: Khimiia, pp. 1–4.
- Gamil'ton, U. K. (Hamilton, W. C.) (1972) Revoliutsiia v kristallografii [The Revolution in Crystallography], *Uspekhi khimii*, vol. 41, no. 3, pp. 566–583.
- Gilinskaia, E. A., and Kochanova, N. N. (1977) Informatsionnyi poisk v oblasti kristallokhimii i kristallografii [Information Retrieval in the Field of Crystal Chemistry and Crystallography], *Zhurnal Vsesoiuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*, vol. 22, pp. 398–407.
- Gol'dshmidt, V. M. (Goldschmidt, V. M.) (1937) *Kristallokhimiia [Crystal Chemistry]*. Leningrad: ONTI Khimteoret.
- Goldschmidt, V. M. (1934) Kristallchemie, in: *Handwörterbuch der Naturwissenschaften. 2 Auflage*. Jena: G. Fischer, vol. 5, pp. 1128–1154.
- Hassel, O. (1934) *Kristalchemie*. Dresden and Leipzig: Th. Steinkopff.
- Kedrov, B. M. (1980) O sovremennoi klassifikatsii nauk [On the Modern Classification of Sciences], *Voprosy filosofii*, no. 10, pp. 85–103.
- Khoenberg, P. (Hohenberg, P. C.) (1970) Dal'nii poriadok pri sverkhprovodiashchem perekhode [Long-Range Order at the Superconducting Transition], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 102, pp. 239–246.
- Khramov, Iu. A. (1983) *Fiziki [Physicists]*. Moskva: Nauka.
- Niggli, P. (1916) Die Struktur der Kristalle, *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, vol. 94, pp. 207–216.
- Parthe, E. (1964) *Crystal Chemistry of Tetrahedral Structures*. New York; London: Gordon and Breach.
- Pfeiffer, P. (1915) Die Kristalle als Molekülverbindungen, *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, vol. 92, pp. 376–380.
- Prewitt, Ch. T. (1985) Crystal Chemistry: Past, Present and Future, *American Mineralogist*, vol. 70, pp. 443–454.
- Rammelsberg, K. F. (1852) *Lehrbuch der Kristallkunde, Order, Anfangs Grunde der Kristallphysik und Kristallochemie*. Berlin: P. Jeanreaaud.
- Shafranovskii, I. I. (1978, 1980) *Istoriia kristallografii [The History of Crystallography]*. Leningrad: Nauka, vols. 1–2.
- Stillvell, Ch. W. (1938) *Crystal Chemistry*. New York; London: McGraw Hill Book Co.
- Strukturbericht* (1931). Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, vol. 1.
- Tsirel'son, V. G. (1986) Funktsiia elektronnoi plotnosti v kristallokhimii: metody opredeleniia i interpretatsiia [The Function of Electron Density in Crystal Chemistry: Determination Methods and Interpretation], *Itogi nauki i tekhniki*, seriia: Kristallokhimiia. Moskva: VINITI, vol. 20: Elektronnaia kristallokhimiia [Electronic Crystal Chemistry], pp. 3–123.
- Tsirel'son, V. G. (2010) *Kvantovaia khimiia. Molekuly, molekuliarnye sistemy i tverdye tela [Quantum Chemistry. Molecules, Molecular Systems, and Solids]*. Moskva: BINOM. Laboratoriia znanii.
- Tsirel'son, V. G., and Antipin, M. Iu. Novye predstavleniia o khimicheskoi sviazi po dannym raspredeleniia elektronnoi plotnosti [New Ideas about Chemical Bond Based

- on the Data on the Electron-Density Distribution] (1989), in: Porai-Koshits, M. A. (ed.) *Problemy kristallokhimii* [The Problems of Crystal Chemistry]. Moskva: Nauka, pp. 119–160.
- Vainshtein, B. K. (1979) Simmetriia kristallov. Metody strukturnoi kristallografii [The Symmetry of Crystals. Structural Crystallography Methods], in: Vainshtein, B. K., Chernov, A. A., and Shuvalov, L. A. (eds.) *Sovremennaia kristallografiia (v chetyrekh tomakh)* [Modern Crystallography (in four volumes)]. Moskva: Nauka, vol. 1, p. 7.
- Vainshtein, B. K. (1982) Kristallografiia segodnia [Crystallography Today], *Kristallografiia*, vol. 27, no. 6, pp. 1045–1055.
- Vul'f, G. V. (1916) Braggi [The Braggs], *Priroda*, no. 7–8, pp. 887–891.
- Vul'f, G. V. (1916) Predislovie k russkomu perevodu [Preface to the Russian Translation], in: Bragg U. Kh., and Bragg U. L. (Bragg, W. H., and Bragg, W. L.) *Rentgenovskie luchy i stroenie kristallov* [X-Rays and Crystal Structure]. Moskva: Kosmos, pp. 1–10.
- Wyckoff, R. W. G. (1924) *The Structure of Crystals*. New York: The Chemical Catalog Co.
- Zeman, I. (Zemann, J.) *Kristallokhimiia* [Crystal Chemistry]. Moskva: Mir, 1969.
- Zemiatchenskii, P. A. (1895) *Kristallogiia* [Crystallogogy], in: *Entsiklopedicheskii slovar' Brokgauza i Efrona* [Brockhaus and Efron Encyclopedic Dictionary]. Sankt-Peterburg: Tipo-litografiia I. A. Efrona, vol. 16a, p. 751.
- Zorkii, P. M. (1981) *Sovremennaia kristallokhimiia* [Modern Crystal Chemistry], in: Gerasimov, Ia. I. (ed.) *Khimiia nashimi glazami* [Chemistry through Our Eyes]. Moskva: Nauka, pp. 289–305.

Received: December 6, 2019.