

УДК: 929:549 / DOI 10.31343/1029-7812-2023-17-2-4-11

С.В. Кривовичев

Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской
академии наук»
184209 Мурманская обл., Апатиты, ул.
Ферсмана, д. 14
E-mail: s.krivovichev@ksc.ru

В.И. ВЕРНАДСКИЙ И СОВРЕМЕННАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

АННОТАЦИЯ

Владимир Иванович Вернадский (1863–1945) сыграл большую роль в становлении и развитии современной отечественной минералогии. С самого раннего периода его творчества до глубокой старости проблемы минералогии находились в сфере его основных интересов. В частности, он указывал на важность развития минералогической кристаллохимии (в связи с проникновением человечества в тайны атомного строения материи) и технологической минералогии (ввиду её важности для развития минерально-сырьевой базы). Таким образом, в минералогическом творчестве Вернадского соединились интерес к фундаментальным проблемам науки и прикладные вопросы, насущные для развития государства и народного хозяйства.

Ключевые слова: Вернадский, минералогия, кристаллография, история науки.

ABSTRACT

Vladimir Ivanovich Vernadsky (1863–1945) played an important role in the formation and development of modern Russian mineralogy. From the earliest period of his work to an old age, the problems of mineralogy were in the sphere of his main interests. In particular, he pointed out the importance of the development of mineralogical crystal chemistry (in connection with the penetration of mankind into the secrets of the atomic structure of matter) and technological mineralogy (in view of its importance for the development of the mineral resource base). Thus, Vernadsky's mineralogical work combined interest in the fundamental problems of science and applied issues vital for the development of the state and the national economy.

Keywords: Vernadsky, mineralogy, crystallography, history of science

ВВЕДЕНИЕ

Минералогия занимает совершенно особое место в научном наследии В.И. Вернадского. Практически весь первый период его творчества – с начала его научной деятельности и до 1920-х годов – был посвящен именно минералогии и кристаллографии. Предметом его кандидатской диссертации были изоморфные смеси («О физических свойствах изоморфных смесей»; интересно, что изоморфизму была посвящена и кандидатская диссертация Д.И. Менделеева (Менделеев, 1855)), а первой профессиональной должностью ученого была должность консерватора Минералогического кабинета при Императорском Санкт-Петербургском университете. Магистерская диссертация Вернадского была связана с исследованием природных алюмосиликатов («О группе силлиманита и роли глинозема в силикатах» (Вернадский, 1892)), докторская – с явлениями скольжения кристаллического вещества («Явления скольжения кристаллического вещества (физико-кристаллографические исследования)» (Вернадский, 1897)), а свою преподавательскую деятельность он начал в качестве приват-доцента кафедры минералогии Императорского Московского университета. В 1906 году Вернадский был избран в Императорскую Санкт-Петербургскую Академию наук адъюнктом, а в 1912 году – академиком именно по минералогии.

Роль минералогии в творчестве Вернадского можно оценить по объему работ, опубликованных ученым по разным дисциплинам и предметам. Анализ 24-томного собрания сочинений В.И. Вернадского, вышедшего в свет в год 150-летнего юбилея ученого, в 2013 году, в издательстве «Наука» (Вернадский, 2013а), показывает, что объемная доля трудов по минералогии и кристаллографии (по количеству страниц) – составляет примерно четверть и превышает общий объем трудов по геохимии и биогеохимии (рис. 1).

Таким образом, на протяжении достаточно долгого времени минералогия занимала, пожалуй, наиболее значительное место как в профессиональной (преподавательской и организационной),

так и в научно-исследовательской деятельности Вернадского. Впоследствии проблемы минералогии в творчестве ученого отошли на второй план, уступая место разработкам проблем геохимии, биогеохимии и живого вещества, однако минералогические проблемы никогда полностью не исчезали из сферы его внимания. Время от времени в печати появлялись статьи и заметки ученого по минералогии, – пожалуй, хронологически самой последней минералогической работой была его статья «О земных алюмофосфорных и алюмосерных аналогах каолиновых алюмосиликатов», напечатанная в «Докладах АН СССР» в 1938 году, в год 75-летия Вернадского (Вернадский, 1938).

ПРЕПОДАВАНИЕ МИНЕРАЛОГИИ

Читая лекции по минералогии в Московском университете, Вернадский (рис. 2) практически полностью перестроил саму модель преподавания этой дисциплины. Как сам он указывал в своей книге «История минералов земной коры» (Вернадский, 1923) (рис. 3), существует две точки зрения на минералогия – одна статическая (её Вернадский связывал с именем великого шведского натуралиста Карла Линнея), – другая – динамическая (основателем этой точки зрения ученый считал Жоржа-Луи Леклерка де Бюффона). «Наше время, когда историческое чувство проникло глубочайшим образом в научное мировоззрение человека и эволюционные идеи охватили всю мысль натуралиста, мы неизбежно возвращаемся к динамическим воззрениям Бюффона, позволяющим удобно охватить бесконечно разросшуюся и разрастающуюся область фактов минералогии», – писал В.И. Вернадский в 1923 году (Вернадский, 1923). Его ученик академик А.П. Виноградов – первый директор Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского, – вспоминал, что «...в Московском университете Владимир Иванович коренным образом перестроил преподавание минералогии. Вместо скучного описания минералов он создал генетическую минералогия...» (Виноградов, 1963). Этот динамический или генетический или эволюционный подход не только к преподаванию минералогии, но и к минералогическим исследованиям, оказал глубокое влияние на последующее развитие этой науки в Советском Союзе и России. Исходя из этого подхода Вернадский определял минералогия как молекулярную и

кристаллическую химию земной коры, отделяя её тем самым от геохимии как атомной химии земной коры. Это определение минералогии представляется сегодня весьма актуальным, когда многие за рубежом говорят о необходимости «молекулярной геологии», которая заняла бы по отношению к геологии то место, которое молекулярная биология занимает по отношению к биологии (Rustad, 2010).

Особый творческий стиль в преподавании минералогии, широкая эрудиция и способность верно угадывать ход движения научной мысли поставили В.И. Вернадского во главе минералогическо-геохимической школы России первой половины XX века. Не случайно, что практически все основные академические институты, работающие и по сей день в области минералогии и геохимии, были основаны или самим ученым, или его ближайшими учениками. Влияние личности В.И. Вернадского на формирование современной российской минералогии и геохимии трудно переоценить.

ЗАДАЧИ МИНЕРАЛОГИИ В НАШЕЙ СТРАНЕ

Как хорошо известно, совершенно удивительным у Вернадского было сочетание его глубоко философского подхода к научным проблемам с чутким пониманием практических приложений их решений в народном хозяйстве, в жизни страны и народа. Можно сказать, что прикладные проблемы, включая проблемы освоения минеральных богатств России, совершенно гармонично вытекали из его философии науки. В этом его можно сравнить, пожалуй, с его учителями по Санкт-Петербургскому университету, – такими выдающимися учеными как Д.И. Менделеев и В.В. Докучаев. Такое соединение фундаментальной и даже философски ориентированной науки с практическими приложениями является глубоко традиционным для отечественной академической мысли. Этот подход самым существенным образом отразился и на всей советской и российской минералогии и геохимии. В качестве примера можно привести ученика Вернадского – вице-президента АН СССР А.Е. Ферсмана, в работах которого самым тесным образом соприкасались фундаментальная и прикладная наука.

Сочетание фундаментально ориентированного и прикладного подходов к решению проблем минералогии нашло своё яркое отражение в статье

«Задачи минералогии в нашей стране (1917–1927)», представляющей собой тезисы выступления Вернадского, произнесенного в Клубе научных работников в Ленинграде 19 ноября 1927 года (Вернадский, 1928). В этой речи учёным были намечены основные направления развития минералогии в Советском Союзе. Представляется необходимым остановиться на двух основных аспектах этой науки, развитие которых было намечено ученым. Во-первых, это кристаллохимическое направление, которое в 1927 году только нарождалось и которое сейчас является одним из доминирующих. Вторым и весьма актуальным сегодня является развитие прикладных аспектов минералогии.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ КРИСТАЛЛОХИМИЯ

В 1899 году было открыто рентгеновское излучение, а в 1912 году немецким ученым Максом фон Лауэ и его сотрудниками Фридрихом и Книппингом было открыто явление дифракции рентгеновских лучей на кристаллах. Уже вскоре после этого появились первые расшифровки кристаллических структур минералов и стало ясно, что их симметрия и устройство полностью описываются 230-мя пространственными группами симметрии, которые были выведены впервые великим русским кристаллографом Евграфом Степановичем Фёдоровым, память и труды которого Вернадский глубоко чтит. «Федоров дал теорию кристаллического строения, – писал Вернадский. – Можно сказать, что вся новая минералогия построена на его великом обобщении» (Вернадский, 1928). Говоря о значении рентгеноструктурного анализа для минералогии, В.И. говорил, что этот метод «быстро сдвигает минералогию на новый путь и открывает перед ней негаданные, огромные перспективы... можно с уверенностью утверждать, что будущее вступившей на этот путь минералогии чревато величайшими последствиями» (Вернадский, 1928). Действительно, кристаллохимия представляет собой ядро минералогии как учении о природном кристаллическом веществе, образовавшемся в результате гео- или космохимических процессов на Земле и во Вселенной. К сожалению, ситуация с развитием этой новой минералогии в 1927 году в Советском Союзе была достаточно плачевной. В.И. с горечью констатировал, что «...наша страна в этом движе-

нии мысли и научной работы почти не участвует. Среди тысяч количественных определений рентгеновских констант естественных тел нет, кажется, ни одного, сделанного в нашей стране. ...Сейчас у нас нет, насколько знаю, ни в одном высшем учебном заведении ни одной полной рентгеновской установки» (Вернадский, 1928).

В.И. Вернадский и, главным образом, его ученик академик А.Е. Ферсман прикладывали значительные усилия для того, чтобы исправить сложившееся положение вещей. В Ломоносовском институте в Ленинграде сотрудником Биогеохимической лаборатории и Ломоносовского института Бруно Карловичем Бруновским (рис. 4) была создана рентгеновская установка, на которой удалось решить первую в Советском Союзе и России кристаллическую структуру – это был минерал катаплеит, образец которого был получен от Е.Е. Костылевой, которая, в свою очередь, отобрала его в одной из экспедиций А.Е. Ферсмана в Хибины. Таким образом, начало структурной минералогии в России тесно связано с Кольским полуостровом и его удивительными минеральными богатствами. К сожалению, вскоре после публикации статьи с результатами расшифровки катаплеита (Brunowsky, 1936) Б.К. Бруновский (немец по национальности) был арестован и в 1938 году погиб в тюрьме. «Никаких сомнений, что невинно», – писал в дневниках Вернадский (Вернадский, 2013б, с. 103). Не помогло и письмо Вернадского самому Вышинскому. «Убийство Б. К. Бруновского — никак иначе нельзя... чувствовать как проявление гниения идеологической основы коммунистического строя, к сожалению, встречающегося на каждом шагу», – писал В.И. в своей «Хронологии» уже в годы Великой отечественной войны (Вернадский, 2013б, с. 533).

Дело Бруновского не осталось забытым. Рентгеновская установка и развитие рентгеноструктурного анализа в Советском Союзе были подхвачены сподвижником Вернадского и Ферсмана, пусть и более молодым, Николаем Васильевичем Беловым, впоследствии академиком и президентом Международного Союза кристаллографов (рис. 5). Его перу принадлежат две классические книги по структурной минералогии, ставшие настольными для нескольких поколений российских минералогов

и кристаллографов – «Структура ионных кристаллов и металлических фаз» (Белов, 1947) и «Очерки по структурной минералогии» (Белов, 1976). Заокеанский коллега Н.В. Белова – профессор Массачусетского технологического института Мартин Бюргер – писал о нём: «...Белов знает о симметрии всё и, вместе со своими учениками, определил атомные расположения в структурах природных силикатов больше, чем кто-либо на Земле» (Bueger, 1968).

Говоря о роли прогресса в кристаллографии в развитии минералогии, нельзя не упомянуть о революции в инструментальных методах структурного исследования кристаллов, произошедшей на рубеже XX и XXI веков и в определенной мере еще не закончившейся. В частности, значительный прогресс в минералогии XXI века как «молекулярной химии Земли» был достигнут благодаря трем основным технологическим инновациям в области исследования кристаллического вещества:

- введение плоских детекторов рентгеновского излучения (приборы с зарядовой связью (CCD: charge-coupled device); рентгеночувствительные пластины с оптической памятью (IP: imaging plate)), обладающих высоким разрешением, экспрессностью и высокой чувствительностью;
- использование высокоэнергетичного синхротронного излучения (источники третьего и четвертого поколений), позволяющего проводить исследования микронных образцов и *in situ* исследований (в том числе в режиме реального времени);
- методов электронной дифракционной томографии и высокоразрешающей электронной микроскопии атомарного разрешения (изучение нанометровых образцов).

Использование этих методов уже в XXI веке привело к целому ряду открытий, которые представляются знаковыми для современной минералогии.

Необходимо особенно отметить использование в рентгеноструктурном анализе минералов плоских детекторов рентгеновского излучения, которое сделало сам процесс структурного исследования достаточно рутинным для кристаллов хорошего качества. Сейчас такие дифрактометры имеются на кафедрах кристаллографии Санкт-Петербургского

и Московского университетов, а также в центре коллективного пользования Кольского научного центра (упомяная только приборы, находящиеся в лабораториях геологического или минералогического профиля).

Среди наиболее примечательных открытий, сделанных в нашем веке с использованием этих приборов, следует, во-первых, отметить это открытие совершенно нового для минералов класса полиоксометаллатов, хорошо известного химикам примерно с середины прошлого века. Здесь следует отметить, в частности, работы американских ученых, особенно сотрудника Лос-Анжелеского музея естественной истории Энтони Кампфа, которым был открыт целый ряд новых минеральных видов, содержащих в своей структуре полиоксометаллатные кластеры (рис. 6). Эти кластеры, несомненно, присутствуют не только в кристаллическом состоянии, но и в природных водных растворах и флюидах, из которых они кристаллизуются. Иными словами, речь идет о молекулярной форме переноса вещества в геохимических системах, – это вполне новое слово для минералогии и геохимии (Krivovichev, 2020).

Большое количество новых минеральных видов в последние годы было открыто на фумаролах вулкана Толбачик на Камчатке, главным образом, благодаря работе коллектива под руководством члена-корреспондента РАН И.В. Пекова (кафедра минералогии геологического факультета МГУ). Одним из наиболее интересных открытий здесь стали полиоксокупратные кластеры (рис. 7) в арсмирандите и леманните – двух минералах, кристаллизующихся непосредственно из вулканических газов (Britvin et al., 2020; Pekov et al., 2020). Это достаточно редкий пример полиоксометаллатов, которые существуют и переносятся в газовой, а не в водной среде. Минерал был найден сотрудниками МГУ, а структурные исследования проводились в Санкт-Петербургском университете.

Химикам хорошо известны так называемые металл-органические каркасы – координационные полимеры, в которых металлические ионы связаны молекулярными линкерами – отдельными органическими молекулами в двух- или трехмерные каркасные постройки. В 2016 году нам удалось

обнаружить первые примеры таких соединений в природных минералах – степановите и жемчужниковите (Huskić et al., 2016). Эти минералы были открыты еще в XX веке в СССР и названы в честь академика Павла Ивановича Степанова и члена–корреспондента АН СССР Юрия Апполоновича Жемчужникова. Использование дифрактометров с плоскими детекторами позволило впервые охарактеризовать кристаллические структуры этих минералов и показать их принципиальную принадлежность к металл–органическим каркасам. В этой работе как бы дважды выразились научные интересы В.И. Вернадского – во–первых, в отношении минералогии как молекулярной химии земной коры – молекулярной химии в том числе и органической, и, во–вторых, в самом характере этих минералов, возникших на границе геосферы и биосферы (они были обнаружены в угольных месторождениях Сибири).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

От развития фундаментальной минералогии необходимо перейти к минералогии прикладной, исследования в рамках которой сейчас приобретают особую актуальность. В своей речи о задачах минералогии в нашей стране В.И. Вернадский писал о том, что «...правильная постановка минералогии сейчас имеет не только огромное, незаменимое значение для теоретической мысли, но она затрагивает практические первостепенного значения интересы нашей страны» (Вернадский, 1928). О чем здесь говорил Вернадский? Разумеется, он имел в виду то значение, которое имеют прикладные минералогические исследования для разведки и освоения месторождений полезных ископаемых, а также для разработки технологий обогащения и переработки руд промышленно важных металлов. Крайне актуальной является сейчас и задача создания новых технологических решений для переработки отвалов рудных месторождений и некондиционных руд на тех месторождениях, которые были открыты и уже разрабатываются с советских времен. В качестве примера важности технологической минералогии для современного производства можно привести проект создания совместного научно–исследовательского центра по изучению апатит–нефелиновых руд перспективной добычи Кольского научного центра

РАН и компании ФосАгро в городе Апатиты Мурманской области. Основной целью этого проекта является достижение стабильно высокого качества апатитового концентрата в условиях изменчивости минерального состава руды, то есть, сугубо промышленная, индустриальная цель. Среди первостепенных задач, направленных на достижение этой цели, ставятся задачи исключительно минералогического характера, включая минералогическое изучение руды и технологическое 3d–картирование запасов руды. Этот пример показывает, что Владимир Иванович Вернадский был во многом прав, когда говорил о том, что «...учение о полезных ископаемых является сейчас, в своей основе, прикладной минералогией, и прикладная геология играет в нем с ходом времени все меньшую и меньшую роль» (Вернадский, 1928). Это, конечно же, не значит, что геология стала меньше нужна или востребована, – скорее всего, Вернадский хотел подчеркнуть важную роль именно прикладной минералогии в учении о полезных ископаемых.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Есть еще одно интересное направление в современной прикладной минералогии, которое В.И. Вернадский провидел лишь отчасти. В своих работах по минералогии он не раз говорил о необходимости эксперимента в минералогии для исследования процессов образования минералов, для получения аналогов тех или иных минералов. В наше время это замечание выразилось в создании на основе минералогической информации новых природоподобных технологий, основанных на использовании минералоподобных материалов. В качестве примера можно привести разработки в области радиоэкологии, которые возглавлялись вице–президентом РАН Николаем Павловичем Лаверовым и сейчас ведутся в ИГЕМе под руководством члена–корреспондента РАН С.В. Юдинцева. Речь идет о пирохлор–муратаитовых керамиках для захоронения радиоактивных отходов сложного состава (Лавёров и др., 1998). Муратаит и минералы группы пирохлора – известные минералы гранитных пегматитов, многие из них были описаны на территории Российской Федерации. Исследования, проведенные в ИГЕМе, показали необычайно высокую емкость муратаитовых керамик в отноше–

нии урана и трансурановых элементов – в первую очередь, плутония. В ходе экспериментально–минералогических исследований были обнаружены новые разновидности муратаита, для которых академиком В.С. Урусовым (рис. 8) была предложена так называемая полисоматическая модель строения (Урусов и др., 2005). Полисоматизм – это явление, при котором кристаллическая структура минералов строится из модулей или фрагментов как бы изъятых из кристаллических структур более простых минералов. Наши структурные исследования (Krivovichev et al., 2010; Pakhomoval et al., 2016) показали, что муратаит–пирохлоровые фазы построены комбинацией муратаитовых и пирохлоровых модулей по принципу русской матрёшки, – так, что новая фаза когерентно нарастает на предыдущую фазу, как бы обволакивая её. Тем самым достигается дополнительный микроструктурный эффект, определяющий устойчивость матрицы к выносу радионуклидов в окружающую среду. На муратаитовых керамиках сходятся сразу несколько направлений современной минералогии, обозначенных Вернадским – это и эксперимент в минералогии, и важность детальных кристаллохимических исследований, и прикладное или технологическое направление, и, наконец, использование минералоподобных соединений в радиозекологии или радиогеологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение кажется полезным процитировать высказывание В.И. Вернадского, выражающее, на наш взгляд, одну из важнейших традиций отечественной академической науки: «...Хотя *sub specie aeternitatis* (с точки зрения вечности) достижения чистой науки, двигающие на новый высокий уровень человеческую мысль, по сути вещей гораздо более значительны и в конце концов в истории и планеты и человечества более могущественны, чем величайшие завоевания прикладного знания, – в текущей жизни, для современников, гораздо большее значение имеют крупные достижения прикладного знания» (Вернадский, 1928). Именно сочетание этих двух аспектов научного знания – фундаментального и прикладного – отражает подход В.И. Вернадского к минералогии и к науке в самом широком смысле этого слова.

ЛИТЕРАТУРА

- Белов Н.В. Структура ионных кристаллов и металлических фаз. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 237 с.
- Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М.: Недра, 1976. 344 с.
- Вернадский В.И. О группе силлиманита и роли глинозема в силикатах: Рассуждение В.И. Вернадского. – М.: Имп. Моск. о-во испытателей природы, 1891. [2], 100 с.
- Вернадский В.И. Явления скольжения кристаллического вещества. М.: Унив. тип., 1897. 182 с.
- Вернадский В.И. История минералов земной коры. Т. 1. Вып. 1. Л.: Научн. хим.–техн. изд-во, 1923. 210 с.
- Вернадский В.И. Задачи минералогии в нашей стране (1917–1927) // Природа. 1928. Т. 17. № 1. С. 21–40.
- Вернадский В.И. О земных алюмофосфорных и алюмосерных аналогах каолиновых алюмосиликатов // Докл. АН СССР. 1938. Т. 18. № 4/5. С. 287–294.
- Вернадский В.И. Собрание сочинений в 24 т. М.: Наука, 2013а.
- Вернадский В.И. Собрание сочинений в 24 т. Т. 21. Дневники В.И. Вернадского 1935–1939 гг. М.: Наука, 2013б.
- Виноградов А.П. 100 лет со дня рождения В.И. Вернадского // Геохимия. 1963. № 3. С. 195–198.
- Лаверов Н.П., Соболев И.А., Стефановский С.В., Юдинцев С.В., Омеляненко Б.И., Никонов Б.И. Синтетический муратаит – новый минерал для иммобилизации актинидов // Докл. РАН. 1998. Т. 362. № 5. С. 670–672.
- Менделеев Д.И. Изоморфизм в связи с отношениями кристаллической формы к составу // Горный журнал. 1855. № 8. С. 229–400.
- Урусов В.С., Органова Н.И., Каримова О.В., Юдинцев С.В., Стефановский С.В. Синтетические муратаиты как модулярные члены полисоматической серии пирохлор–муратаит // Докл. РАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 226–232.
- Britvin S.N., Pekov I.V., Yapaskurt V.O., Koshlyakova N.N., Göttlicher J., Krivovichev S.V., Turchkova A.G., Sidorov E.G. Polyoxometalate chemistry at volcanoes: discovery of a novel class of polyoxocuprate nanoclusters in fumarolic minerals // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. Paper 6345.
- Brunowsky B. Die Struktur des Katapleits ($\text{Na}_2\text{ZrSi}_3\text{O}_9 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) // Acta Phys. Chim. URSS. 1936. Bd. 5. S. 863–892.
- Buerger M.J. Scientists and God // Christianity Today. 1968. August 28. p. 6–8.
- Huskić I., Pekov I.V., Krivovichev S.V., Friščić T. Minerals with metal–organic framework structures // Sci. Adv. 2016. Vol. 2. Paper

e1600621.

Krivovichev S.V. Polyoxometalate clusters in minerals: review and complexity analysis // Acta Crystallogr. 2020. Vol. 76. P. 618–629.

Krivovichev S.V., Yudintsev S.V., Stefanovsky S.V., Organova N.I., Karimova O.V., Urusov V.S. Murataite–pyrochlore series: a family of complex oxides with nanoscale pyrochlore clusters // Angew. Chem. Int. Ed. 2010. V. 49. P. 9982–9984.

Pakhomova, A.S., Krivovichev, S.V., Yudintsev, S.V., Stefanovsky, S.V. Polysomatism and structural complexity: Structure model for Murataite–8C, a complex crystalline matrix for the immobilization of high-level radioactive waste // Eur. J. Mineral. 2016. Vol. 28. P. 205–214.

Pekov I.V., Britvin S.N., Yapaskurt V.O., Koshlyakova N.N., Göttlicher J., Chukanov N.V., Vlgasina M.F., Krivovichev S.V., Turchkova A.G., Sidorov E.G. Arsmirandite, $\text{Na}_{18}\text{Cu}_{12}\text{Fe}^{3+}\text{O}_8(\text{AsO}_4)_8\text{Cl}_5$, and lehmannite, $\text{Na}_{18}\text{Cu}_{12}\text{TiO}_8(\text{AsO}_4)_8\text{FCl}_5$, new mineral species from fumarole exhalations of the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia // *Зан. Росс. минерал. о-ва*. 2020. Т. 149(3). С. 1–17.

Rustad J.R. Elementary reactions in polynuclear ions and aqueous–mineral interfaces: a new geology // Adv. Inorg. Chem. 2010. Vol. 62. P. 391–436.



Рис. 1. Распределение научных трудов В.И. Вернадского по разным областям науки (по числу страниц в собрании сочинений (Вернадский, 2013а)).



Рис. 2. В.И. Вернадский – ординарный профессор Императорского Московского университета (1905).



Рис. 3. Обложка первого издания монографии В.И. Вернадского «История минералов земной коры».



Рис. 4. Б.К. Бруновский (1900–1938) – автор первой отечественной расшифровки кристаллической структуры.



Рис. 5. Академик Н.В. Белов (1891–1982) – основатель отечественной структурной минералогии.

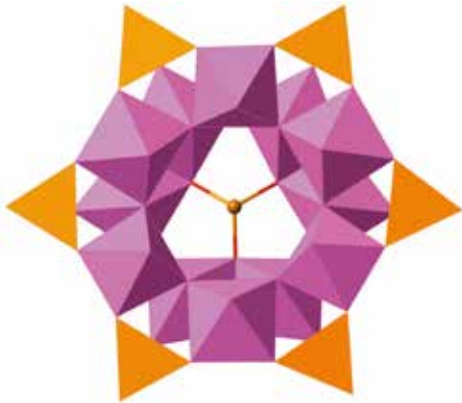


Рис. 6. Полиоксометаллатный кластер $[As^3+V^4+2V^5+10As^5+6O_{51}]$ из кристаллической структуры моррисонита (оранжевым и сиреневым цветом показаны арсенатные и ванадатные координационные полиэдры).

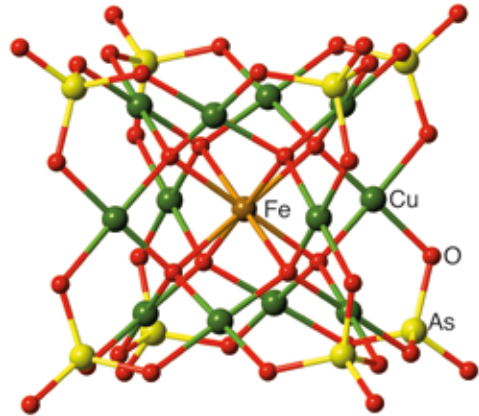


Рис. 7. Полиоксокупрат–арсенатный кластер в кристаллической структуре арсмирандита – нового минерала из fumarol вулкана Толбачик (Камчатка).

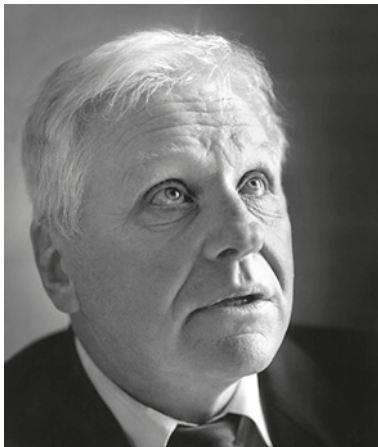


Рис. 8. Академик В.С. Урусов (1936–2015).