

УДК 549.9

О НЕКОТОРЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ МИНЕРАЛОГИИ

Ю.Л. Войтеховский

Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, woyt@geoksc.apatity.ru

SOME THEORETICAL PROBLEMS OF MINERALOGY

Yu.L. Voytekhsy

Geological Institute KSC RAS, Apatity, woyt@geoksc.apatity.ru

В статье коротко рассмотрены старые фундаментальные проблемы минералогии – определение минерального вида, построение системы минералогии и развитие теории филогении минералов. Показана возможность понимания минерального вида в объёме минеральной серии по Дж.Д. Дэна. Она позволяет развить филогению минералов – теорию эволюции (изменения конфигурации) минеральных видов при направленном изменении физико-химических параметров в системе. Показано также, что система минералогии не обязана быть классификацией. Её альтернативные представления – пространства толерантности и структуры

Илл. 6. Библ. 22.

Ключевые слова: минеральный вид, система минералогии, филогения минералов.

The old fundamental problems of mineralogy (mineral species, system of mineralogy and phylogeny of mineralogy definitions) are briefly considered in the paper. The understanding of mineral species as a mineral series by J.D. Dana is shown to be reasonable. It provides an opportunity to develop the phylogeny of minerals, i.e., the theory of mineral species evolution under directed changes of physical-chemical parameters in the system. The system of mineralogy should not look like a classification. The tolerance spaces and structures are the alternative possibilities.

Figures 6. References 22.

Keywords: mineral species, system of mineralogy, phylogeny of minerals.

Введение

Написанию этой статьи предшествовала цепь событий. На конференциях «Морфогенез в индивидуальном и историческом развитии: симметрия и асимметрия» (ПИН РАН, г. Москва, 14–16.11.2012) и «Морфогенез в индивидуальном и историческом развитии: гетерохронии, гетеротопии и аллометрия» (там же, 16–18.04.2014) в рамках концепций онтогенеза и филогенеза (онтогении и филогении в минералогической терминологии) были рассмотрены примеры биоминеральных аналогий и общие подходы к их описанию средствами теории симметрии. Во время научных чтений памяти К. Линнея (ГИ и ММБИ КНЦ РАН, Мурманск, 28.05.2014) на общей эволюционной платформе обсуждены понятия индивида, вида и современ-

ные представления о системе видов в биологии и минералогии. По-видимому, в обеих науках эти проблемы относятся к категории вечных. Но следует признать, что после ухода из жизни проф. Д.П. Григорьева (29.10.1909–12.03.2003), д.г.-м.н. А.Г. Жабина (12.07.1934–09.06.2007) и акад. Н.П. Юшкина (20.05.1936–17.09.2012) их активное осмысление сместилось в биологию и палеонтологию. Для обсуждения этой области минералогии необходима Всероссийская конференция «Онтогенез, филогения и система минералов». Лучшее место проведения обусловлено исторически – Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс (рис. 1). Далее для предварительного обсуждения предлагаются несколько наиболее актуальных вопросов. Привлечение для аргументации биоминеральных



Рис. 1. Открытие II Всесоюзной школы по онтогении минералов. Миасс, май 1982 г. Фото из хранящегося в Комиссии по истории РМО архива проф. Д.П. Григорьева (слева направо): Д.П. Григорьев, В.А. Попов, А.Г. Жабин, Н.П. Юшкин.

аналогий представляется уместным, поскольку речь идёт о самых общих категориях, идущих от К. Линнея (23.05.1707–10.01.1778).

Минеральные индивиды и виды

«В течение XVIII и части XIX вв. выработались два основных понятия, относящихся к её объектам: понятие о минеральных индивидах и понятие о минеральных видах. Первое из них, т.е. понятие о минеральных индивидах или, как тогда говорили, об «индивидуумах минерального мира», «минеральных неделимых», «особях минералов», формулируется приблизительно так: индивид – это образовавшееся в природе обособление однородного химического вещества, физически отделённое от других естественными поверхностями раздела. Индивидом является как природный кристалл, ограниченный кристаллическими гранями, так и каждое минеральное зерно или другое однородное выделение, отделённое от соседей поверхностями соприкосновения»

(Григорьев, 1961, с. 12). В этой формулировке (см. также Григорьев, Жабин, 1975; Жабин, 1979) содержится едва ли не вся проблематика строгого определения минерального индивида. Как и 200 лет назад, мы продолжаем «формулировать приблизительно». Отметим три момента данного определения.

Как понимать «индивид – это образовавшееся в природе обособление...»? Какова допустимая мера участия человека в рождении минерального индивида? Б.В. Чесноков с соавторами утвердили ряд новых минералов, образовавшихся в горелых отвалах Челябинского угольного бассейна. Но затем КНМНМ МА прекратила этого делать, ведь отвалы созданы человеком. А как быть с минеральными индивидами внутри самого человека? Они образовались в природе или ещё где-то? Уже известно, что среди них есть патологические и функциональные. Относительно первых человека можно уподобить автоклаву или пробирке, относительно вторых – природной среде. Но является ли человек частью природы или

уже разорвал связующую пуповину? Рассуждая по аналогии, выращенным в лабораториях биологическим клонам надо отказать в статусе полноправных индивидов. И не отказать ли в правах индивидам Homo sapiens, родившимся от суррогатных матерей при определяющем участии врачей?.. Есть мнение, будто понятие минерального индивида ясно и без строгого определения. Автор с этим не согласен, т.к. понятие не может быть ясным до определения. Ясность (однозначность, прозрачность) понятия означает его полную определённую. Дело с определениями в минералогии обстоит серьёзно – мы видим, как даже в исходном пункте минералогическая часть проблемы незаметно переходит в этическую.

Как понимать «индивид – это ... обособление однородного химического вещества...»? Какова мера неоднородности, допустимая для минерального индивида? Хорошо известно, сколь сильно варьируют химические составы различных зон и пирамид нарастания. «Поскольку кристаллизация минералов никогда не идёт в абсолютно неизменных условиях, ... одновременно образовавшиеся зоны имеют различный химический состав и разное кристаллическое сложение ... Наряду с хронологически различными частями минерала – зонами роста – при кристаллизации создаются различные части кристалла ... за счёт отложения вещества на разных гранях или разных участках иных поверхностей минерала (у зёрен). Эти части индивида Ф. Бекке назвал ... пирамидами нарастания ... Неодинаковость пирамид нарастания разных граней по содержанию химических примесей зависит от того, что на способности грани к поглощению примеси сказываются степень структурного подобия смешивающихся компонентов, а также внешние условия роста кристалла ...» (Григорьев, 1961, с. 56, 60). Строго говоря, из-за неоднородности состава минеральные индивиды даже нельзя называть минеральными фазами, что бывает сплошь и рядом. Известны случаи, когда одну пирамиду нарастания образует танталит, другую – колумбит, аналогии можно продолжить. Как уживаются два минеральных вида в одном индивиде? Проф. Д.П. Григорьев был весьма смущён этим обстоятельством и постоянно обращал внимание на него в своих лекциях. Биология таких «кентавров» не знает. Как минимум одно из понятий – индивид или вида – в минералогии надо переопределить ради устранения противоречия.

Как понимать «индивид – это ... обособление ..., физически отделённое от других естественными

поверхностями раздела»? Обратим внимание на логическое противоречие фразы, известное ещё Аристотелю. Минеральный индивид определяется через «естественную поверхность раздела» с другим индивидом, который тоже не определён. Обособленность, ограниченность, конечность минерального индивида корректнее определять через нарушение его некоторого имманентного свойства, например, через замкнутую поверхность разорванных химических связей кристаллической решётки. Впрочем, использование термина «поверхность» в физическом контексте тоже условно. Более надёжным кажется «кристаллическая решётка». Но очевидна тенденция охватить понятием «минерал» даже те природные образования, которые никогда не были или перестали быть кристаллическими (Никель, 1995). Кроме того, «кристаллическая решётка» теряет определённость по мере проникновения в мир наноразмерных структур. С какого фрагмента она распознаётся? С того ли самого момента начинается минеральный индивид? По-видимому, этот рубеж можно определить рентгеновскими методами. В этом видится некая объективность. Но кажется некорректным определять фундаментальное понятие через аналитическую процедуру. «Зарождение минералов является первым моментом их образования. Из трёх этапов генезиса минералов зарождение наименее изучено» (Григорьев, 1961, с. 19). И через 50 лет эта мысль остаётся актуальной. Формально следовало бы различать «минеральные индивиды» с их конституционными атрибутами; «минеральные зародыши», преодолевшие потенциальный барьер и обретшие способность к росту; и «минеральные обособления» с неопределёнными перспективами роста. Итак, категория минерального индивида не может считаться строго определённой по выше указанным и ряду других причин. Попытка его определения «от физически очевидного» базируется на наблюдениях макроскопических образцов и приводит к ряду противоречий.

Не менее противоречива и категория минерального вида. «Понятие о минеральных видах формулировалось, исходя из задач классификации минеральных индивидов. Последние не бесконечно разнообразны. При всех колебаниях их свойств и многообразии формы они совпадают в том или ином числе по своей конституции, т.е. по составу и кристаллической структуре. Отсюда и возникло представление о минеральном виде как совокупности минеральных индивидов, химически и структурно

одинаковых» (Григорьев, 1961, с. 12). В этой фразе отметим три момента. О классификации минеральных видов речь пойдёт далее. Относительно типа кристаллической структуры как видового признака заметим лишь то, что в качестве него сегодня принята пространственная группа симметрии. Это фундаментально в силу наличия теории Фёдорова-Шёнфлиса и удобно, поскольку даёт немалое, но обозримое число классов (230). При необходимости структурная классификация может быть корректно детализирована или, наоборот, укрупнена.

Вопрос о химическом составе как видовом признаке полон условностей. «Минералом обычно называют кристаллическое вещество с определёнными пределами состава, образовавшееся в результате геологических процессов ... Основной критерий новизны состава заключается в том, что, по крайней мере, одна из главных позиций в структуре должна быть занята химическим компонентом, отличающимся от того, который занимает эквивалентную позицию в известном минерале» (Никель, Мандарино, 1989, с. 53). Уже здесь видно стремление к умножению числа минеральных видов – для этого достаточно появления нового (или преобладания известного) химического элемента хотя бы в одной структурной позиции, без выяснения того, существует ли в этой позиции твёрдый раствор с другим минералом. Впрочем, последнее обстоятельство ничего не меняет для «полных твёрдых растворов без структурной упорядоченности» и мало что – для «твёрдых растворов со структурной упорядоченностью и частичных твёрдых растворов» (Никель, 1992). Принятое КНМНМ ММА «правило 50 %» для твёрдых растворов неудачно. Формальное увеличение с его помощью минерального разнообразия планеты, всё равно ничтожного по сравнению с биологическим разнообразием – малая плата за то, что фундаментальная категория минерального вида низведена до уровня искусственной логической конструкции. Минеральный вид в бытующем понимании – не кирпичик мироздания. Истинный минеральный вид должен быть отделён от других естественными (установленными в природе и подтверждёнными лабораторным синтезом и теоретическими расчётами) разрывами смесимости твёрдых растворов.

Принципиальный выход из ситуации предложен давно. «Настоящее издание книги явилось по существу совершенно новой работой... Сделаны следующие коренные нововведения: ... новый способ рассмотрения минералов, образующих так называемые серии, заключающийся в описании серии как едино-

го вида ... Минералы, обнаруживающие непрерывное изменение своих свойств с изменением состава, называются серией и описываются здесь таким же образом, как и вид. В таких случаях естественной минералогической единицей является серия, так как то или иное её произвольное разделение не даёт точного представления о частях серии. Плагиоклазы и шпинели представляют собой примеры серий» (Дэна и др., 1950, с. 8, 13). Радикальный шаг состоит в том, чтобы определить минеральный вид именно в объёме минеральной серии, ограниченной только естественными разрывами смесимости. К сожалению, из-за сложности некоторых минеральных серий указанные авторы сделали шаг назад. «Сложность некоторых многокомпонентных систем заставляет считать целесообразным подразделение обширных серий на частные с обоснованно установленными границами состава и раздельное их описание», хотя эта трактовка и «не подходит в качестве способа представления для некоторых обычных и важных серий, например таких, как группа кальцита. В то же время отдельные описания сделаны так, чтобы подчеркнуть неразрывную связь между видами, заключёнными в серии ... Описательная минералогия в настоящее время перегружена мелкими названиями, а интересы науки, без сомнения, будут лучше удовлетворены при сокращении количества названий и упрощении номенклатуры ... Систематизация номенклатуры таким путем есть естественное выражение концепции изменчивости минерального состава, которая вытесняет старое понимание видов как определенных фаз в основном постоянного состава» (Дэна и др., 1953, с. 7–8).

В отечественной литературе идея минеральных серий давно нашла поддержку. Э.М. Бонштедт-Куплетская (1975) отмечала, что чем больше утверждается новых минеральных видов, тем больше оказывается среди них структурных аналогов уже известных минералов и промежуточных – по составу и структуре – членов минеральных серий. Н.Н. Мозгова (1985) описала гомологические ряды структурно упорядоченных фаз, при определённых условиях превращающиеся в гомогенные области составов нестехиометрических соединений – твёрдых растворов. При определении категории минерального вида в объёме минеральной серии очевидны дискуссионные моменты. Так, под серией можно понимать лишь твёрдые растворы изовалентного замещения по схеме «атом за атом, ион за ион» (Кухаренко, 1970, с. 203). Нам ближе подход Г.Б. Бокия (1975), не накладывавшего слишком строгих ограничений

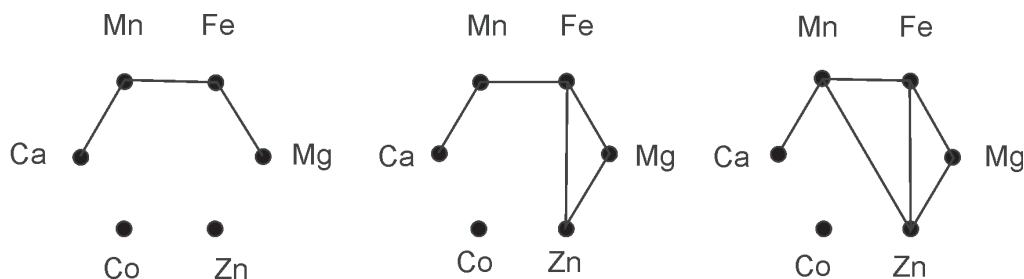


Рис. 2. Соотношения смесимости в группе кальцита: Ca – кальцит, Mn – родохрозит, Fe – сидерит, Mg – магнезит, Zn – смитсонит, Co – сферокобальтит. Вершина графа – минерал, ребро – непрерывный ряд составов. Пояснения в тексте.

на употребление понятия изоморфизма и, следовательно – понятий изоморфной смеси, твёрдого раствора и минеральной серии. Нельзя не видеть, что многообразие минеральных видов становится и более обширным, и более связным. Оно всё более выглядит единой системой, в определённых условиях и благодаря различным механизмам проявляющей себя фрагментами – минеральными видами. Их рассмотрение в как можно более сложных комплексах актуально в противовес бытующему подходу, когда ради выделения минеральных видов расчленяются даже непрерывные ряды составов изоструктурных «минеральных неделимых». (Не потому ли всё тише аплодисменты при вручении дипломов за открытие новых минеральных видов на Годичных сессиях РМО?).

Филогения минеральных видов

Сегодня математическая теория графов обладает достаточными средствами для эффективного описания даже таких «сложных» минеральных серий, как группа кальцита. По данным (Бетехтин, 1950; Костов, 1971; Берри и др., 1987; Эссен, 1987), природные твердые растворы не ограничены в парах кальцит–родохрозит, родохрозит–сидерит и сидерит–магнезит, что показано на рис. 2 (слева). Из сравнения размеров ионов предполагается (Дэна и др., 1953, с. 174–175) непрерывная смесимость в парах смитсонит–сидерит и смитсонит–магнезит (рис. 2, в центре), а по наблюдениям составов природных фаз – в паре смитсонит–родохрозит (рис. 2, справа).

Смесимость в группе шпинели по (Соколов, 1948) показана на рис. 3 (слева). В работе (Irvine T.N., 1965) дополнительно сообщается, что при синтезе выше 860 °C появляется непрерывный твёрдый раствор магнетит–герцинит (рис. 3, в центре), выше 1400 °C – магнетит–хромит (рис. 3, справа). Минеральная серия шпинелидов расширяется за счёт галита ZnAl_2O_4 . Есть данные о его твёрдых растворах с хромитом (Weiser, 1967; Осокин, 1979), шпинелью

и герцинитом (Spry, Scott, 1986). Сюда же можно включить редкие бруногайерит GeFe_2O_4 и купрошпинель CuFe_2O_4 (Бонштедт-Куплетская, 1975, с. 15).

Ещё интереснее серия природных гранатов. По данным приведенных выше авторов по систематической минералогии и (Соболев, 1964), соотношения смесимости в ней показаны на рис. 4. Возможно, сегодня эта минеральная серия – одна из самых сложных по отношениям смесимости.

Итак, описание конфигурации минерального вида (серии, по Дж.Д. Дэна и др.) принципиальных проблем не вызывает. Как это можно использовать по существу? «Всесторонне понимаемое учение о генезисе минералов надо рассматривать как сочетание двух разделов генетической минералогии – онтогенеза, т.е. учения о генезисе минеральных индивидов и агрегатов, и филогении, т.е. учения о генезисе минеральных видов и парагенезисов» (Григорьев, 1961, с. 17). «Филогения минералов – раздел генетической минералогии, посвящённый исследованию процессов генезиса минеральных видов и образования парагенезисов: физико-химические условия видов и парагенезисов, причины кристаллизации, термобарогеохимия, изоморфизм, типоморфизм, типохимизм и т.п.» (Жабин, 1979, с. 12). В биологии филогенез понимается как историческое развитие (эволюция) вида, а условия обитания представителей вида – индивидов и популяций – изучаются в соответствующих разделах экологии. В этом смысле физико-химические условия существования (поля устойчивости) минеральных видов и парагенезисов – не предмет филогенеза. А эволюционировать в меняющихся условиях может лишь парагенезис – отдельные минеральные виды могут появляться или исчезать. Минеральный вид в современном понимании эволюционировать не может, он либо устойчив (с фиксированным химическим составом и кристаллической структурой), либо неустойчив в предлагаемых условиях (проблема метастабильно-

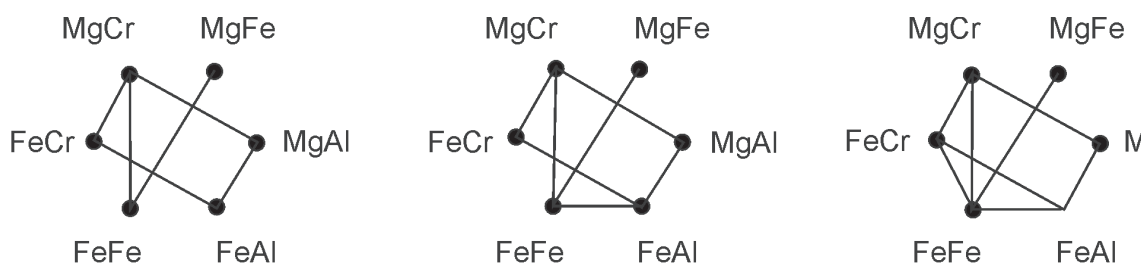


Рис. 3. Соотношения смесимости в группе шпинели: MgCr – пикрохромит, MgFe – магнезиоферрит, MgAl – шпинель, FeAl – герцинит, FeFe – магнетит, FeCr – хромит. Пояснения в тексте.

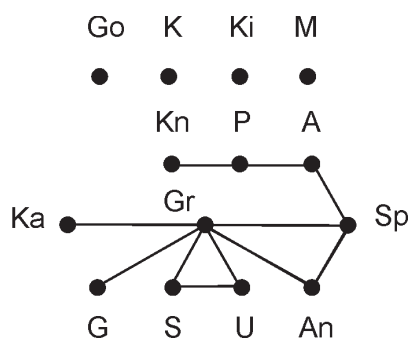


Рис. 4. Соотношения смесимости в группе гранатов: А – альмандин, An – андрадит, G – гибшит, Go – голдманит, Gr – гроссуляр, K – кальдерит, Ka – катоит, Ki – кимцеит, Kn – кноррингит, M – меджорит, P – пироп, S – шорломит, Sp – спессартин, U – уваровит. Пояснения в тексте.

сти к обсуждаемому вопросу отношения не имеет). Легко видеть, что понимание минерального вида в объеме минеральной серии (по Дж.Д. Дэна) впервые позволяет говорить о филогении минерального вида корректно. Его конфигурация (структура) меняется при направленном изменении физико-химических параметров. На рис. 5 и 6 это показано на примере шпинели.

Система минералов

«Минералогия ... с конца XVIII в. изменяет свой характер – внимание минералогов устремляется в сторону описания минералов, открытия новых минеральных видов и разновидностей. В связи с этим появляется необходимость в разработке принципов классификации минералов, и в это время, а также и в первые десятилетия XIX в. многие из минералогов работают над созданием различных «минералогических систем»... Старый метод исследования и мышления, который Гегель называет «метафизическим», который имел дело преимущественно с вещами как с чем-то законченным и неизменным и остатки которого до сих пор ещё крепко сидят в головах, имел в

свое время великое историческое оправдание. Надо было исследовать вещи, прежде чем можно было приступить к исследованию процессов. Надо сначала знать, что такое данная вещь, чтобы можно было заняться теми изменениями, которые в ней происходят» (Григорьев, 1961, с. 10). В этой цитате содержатся сразу две проблемы. Первая – о соотношении «старого метафизического» (его лучше называть структурным) и «нового генетического» методов исследования. Генетический метод не является по отношению к структурному более прогрессивным. Ведь он никогда не отменит необходимости «знать, что такое данная вещь». Это знание должно всё время обновляться. Именно это и происходит сейчас с понятиями минерального индивида, минерального вида и системы минералов в целом. Генетический метод – это выход в другую мыслительную плоскость. И таких методов немало: эволюционный «из чего – что», каузальный «из-за чего – что» (М. Бунге раскалывает его на десяток разновидностей ввиду тонких логических нюансов) и т.д. Вторая – о классификации разросшегося множества минералов и создании различных минералогических систем. На самом деле всё наоборот. Внутренняя потребность исследователя состоит в систематизации изучаемых объектов. И логически простейшей системой всякий раз оказывается классификация, делящая множество на непересекающиеся классы. Именно это мы видим в «Системе природы» К. Линнея и «Системе минералогии» Дж.Д. Дэна и др. В этом ящике – алмазы, в том – топазы; в этом загоне – лошади, в том – овцы. И никаких постепенных переходов. Что может быть проще? Но система не обязана быть классификацией.

Напомним, что в основе любой классификации лежит (рефлексивное, симметричное и транзитивное) отношение эквивалентности, но есть и другие отношения. Так, отношение толерантности (рефлексивное, симметричное, но не транзитивное) по-

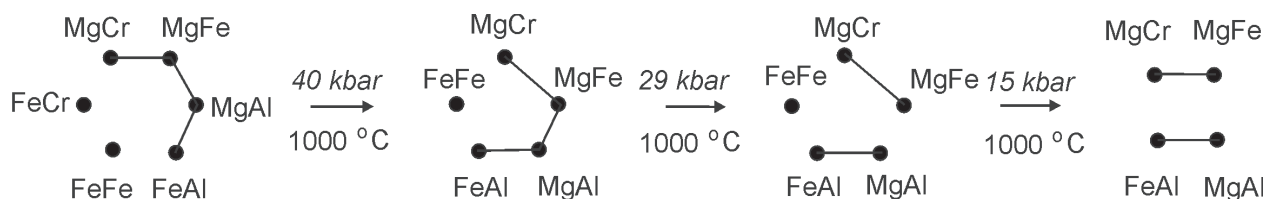


Рис. 5. Филогения шпинели на фоне падения давления. Обозначения на рис. 2.

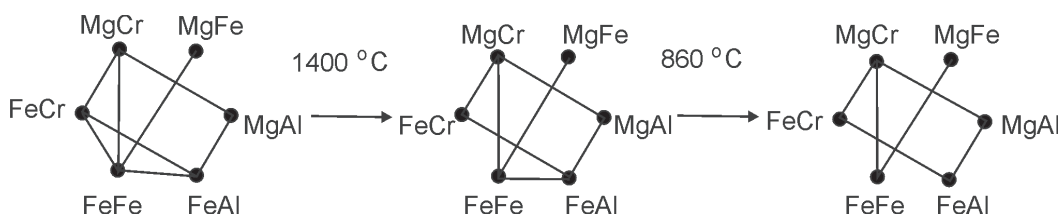


Рис. 6. Филогения шпинели на фоне падения температуры. Обозначения на рис. 3.

рождает пространство толерантности, отношение порядка (строгого, нестрогого, квазипорядка) – структуру (Шрейдер, 1971). Н.Л. Смирнова (1979) показала, что система минеральных видов (в современном понимании) может быть представлена как пространство толерантности с отношением частичного сходства по химическому составу. На уровне минеральных серий – по признаку частичного сходства конфигураций – система минералов может быть представлена как метaproстранство толерантности. «Мета» означает, что минеральные серии даны в графовом выражении, без вещественного содержания. Наконец, эволюции минеральных серий представимы как разрыв ребер или исчезновение вершин графа. В этом случае система минералов представима как (эволюционная по сути) полная структура с отношением нестрогого порядка по признаку вложения графов друг в друга.

Работа (Петров, Краснова, 2010) даёт пример представления системы минералов в виде структуры с отношением строгого лексикографического упорядочения на множестве ранговых химических формул минералов. Последние определены авторами как «последовательности символов химических элементов, расположенных в порядке снижения их атомных содержаний в составе минерала» (с. 5). На первый взгляд – весьма формальное построение. Но алфавитом здесь является периодическая система элементов Д.И. Менделеева, что принципиально отличает R-каталог от любого минералогического словаря, составленного по орфографическому принципу.

Заключение

Категории минерального индивида, минерального вида и системы минералов требуют дальнейшего осмысления и более строгого определения. Минеральные серии с большим основанием отвечают минералогическим первоэлементам (кирпичикам мироздания), чем минеральные виды в их современном понимании. Предлагаемая синтетическая тенденция дополняет бытующую аналитическую и более отвечает природе вещей. Границы минеральных видов должны быть естественными, указанными самой природой в виде разрывов смесимости твёрдых растворов. В соответствии с новым пониманием возникает содержательный вопрос о структурах (конфигурациях) минеральных видов в тех или иных условиях.

Новое понимание минерального вида позволяет впервые поставить вопрос о его филогении – изменении структуры (конфигурации) при направленном изменении физико-химических условий. Современное понимание филогении минерального вида как изучения физико-химических условий его существования (полей устойчивости) некорректно. Скорее, оно имеет биологическую аналогию в «экологии вида». В принятых сегодня понятиях корректно говорить о филогении парагенезиса минеральных видов, но не о филогении одного минерального вида.

Представления о системе минералов становятся менее однозначными, что не означает утрату определённости. Привлечение различных логических интерпретаций определено потребностью к более глубокому познанию. Не может быть «самой пра-

вильной» системы минералов. Перспектива состоит в согласовании разных представлений. Следует ли считать переход от классификаций к пространствам толерантности и структурам всё более содержательным? Нет – так как последующее представление не обязательно охватывает предыдущее. Например, классификация есть частный случай пространства толерантности, но последнее не есть частный случай структуры. Да – так как всякое новое представление системы минералов что-то добавляет в общую картину по логическим свойствам и минералогическим смыслам её внутрисистемных отношений.

Литература

- Берри Л., Мейсон Б., Дитрих Р.* Минералогия. М.: Мир, 1987. 592 с.
- Бетехтин А.Г.* Минералогия. М.: Госгеолтехиздат, 1950. 956 с.
- Бокий Г.Б.* Границы применения понятия «изоморфизм» // Изоморфизм в минералах. М.: Наука, 1975. С. 7–14.
- Бонштедт-Куплетская Э.М.* Новые минералы – члены изоморфных рядов, структурные аналоги известных минералов // Изоморфизм в минералах. М.: Наука, 1975. С. 14–25.
- Григорьев Д.П.* Онтогенез минералов. Львов: Изд. Львовского ун-та, 1961. 284 с.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г.* Онтогенез минералов. Индивидуумы. М.: Наука, 1975. 340 с.
- Дэна Дж.Д., Дэна Э.С., Палач Ч. и др.* Система минералогии. Т. 1, п/т. 1. Элементы, сульфиды, сульфосолы. М.: Изд-во ин. лит., 1950. 608 с.
- Дэна Дж.Д., Дэна Э.С., Палач Ч. и др.* Система минералогии. Т. 2, п/т. 1. Галоиды, карбонаты, нитраты, йодаты, бораты, сульфаты. М.: Изд-во ин. лит., 1953. 774 с.
- Костов И.* Минералогия. М.: Мир, 1971. 584 с.
- Кухаренко А.А.* Проблема изоморфизма в минералогии // Зап. ВМО. 1970. № 2. С. 200–213.
- Мозгова Н.Н.* Нестехиометрия и гомологические ряды сульфосолов. М.: Наука, 1985. 264 с.
- Жабин А.Г.* Онтогенез минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 276 с.
- Никель Е.Х.* Твёрдые растворы в номенклатуре минералов // Зап. ВМО. 1992. № 4. С. 89–92.
- Никель Е.Х.* Содержание понятия минерал // Зап. ВМО. 1995. № 4. С. 98–100.
- Никель Э., Мандарино Дж.* Порядок рассмотрения материалов, представленных в Комиссию по новым минералам и названиям минералов при Международной минералогической ассоциации, и некоторые вопросы минералогической номенклатуры // Минер. журнал. 1989. № 1. С. 51–86.
- Осокин А.С.* Об акцессорных цинксодержащих хромитах // Новые данные по минералогии медно-никелевых и колчеданных руд Кольского п-ова. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1979. С. 89–96.
- Петров Т.Г., Краснова Н.И.* R-словарь-каталог химических составов минералов. СПб.: Наука, 2010. 150 с.
- Смирнова Н.Л.* О системе минералов. Уровни // Вестник МГУ, сер. геол. 1979. № 2. С. 59–63.
- Соболев Н.В.* Парагенетические типы гранатов. М.: Наука, 1964. 218 с.
- Соколов Г.А.* Хромиты Урала, их состав, условия кристаллизации и закономерности распространения // Тр. ИГН АН СССР, сер. рудн. месторожд. Вып. 97. 1948. № 12. 128 с.
- Шрейдер Ю.А.* Равенство, сходство, порядок. М.: Наука, 1971. 255 с.
- Эссен Э.Дж.* Карбонатные твердые растворы и взаимная растворимость их конечных членов применительно к геологической термобарометрии // Карбонаты. Минералогия и химия. М.: Мир, 1987. С. 105–127.
- Irvine T.N.* Chromian spinel as a petrogenetic indicator. Pt. 1. Theory // Can. J. Earth Sci. 1965. V 6–7. N 2. P 648–672.
- Spry P.G., Scott S.D.* The stability of zincian spinels in sulfide systems and their potential as exploration guides for metamorphosed massive sulfide deposits // Econ. Geol. 1986. V 81. P 1446–1463.
- Weiser T.* Zink- und Vanadium-fuerende Chromite von Outokumpu, Finland // Neues Jahrb. Miner. Monatsh. 1967. H 7–8. S 234–243.