РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ГРАНИЦ В МАГМАТИЧЕСКОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЕ

С. С. Шевченко, Р. Л. Бродская, И. В. Бильская, Ю. В. Кобзева, В. Д. Ляхницкая

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург
rimma_brods kaya@vsegei.ru

Кристаллизация магматической горной породы — процесс кооперативный, при котором агрегация минеральных индивидов, их ориентировка, рост, формирование структуры и текстуры и все метрики, отражающие различную физиографию агрегатов, определяются кинетическими и энергетическими характеристиками процесса на разных этапах. Исследование внутренних границ горной породы поэтому является вопросом актуальным, но все еще мало изученным. В статье рассматривается роль границ срастания минеральных зерен в магматической горной породе с точки зрения их геометрии, кристаллографии и энергии, аккумулированной в процессе онтогенеза и индивидов, и агрегата. Так, геометрические характеристики границ (пропорциональные истинным), такие как площадь, протяженность, угловые и линейные взаимоотношения, могут быть получены в плоских сечениях минеральных агрегатов или в петрографических шлифах, где осуществляется диагностика порообразующих и аксессуарных минералов, диагностика горных пород. Кристаллографическая идентификация границ минеральных индивидов также может быть измерена и рассчитана для большинства границ в шлифе. Иногда может быть задействована характеристика плоских сечений минеральных зерен по степени приближения контуров сечений к идиоморфным или ксеноморфным формам. Энергетическая характеристика внутренних границ минерального агрегата может оцениваться опосредованно, в результате расчета и проектирования элементарной ячейки кристаллической решетки минерального зерна на плоскость границы индивида. Каждый из этих способов рассмотрения и характеристики границ индивида и границ срастаний в агрегате является источником информации для реставрации изменения условий образования и формирования минерального агрегата, онтогенеза.

Ключевые слова: границы минеральных индивидов, границы срастания минеральных зерен, энергоемкость границ, энергонасыщенность границ, минеральный агрегат, минеральные индивиды, зерна.

ROLE AND SIGNIFICANCE OF INTERIOR BOUNDARIES AT MAGMATIC ROCKS

S. S. Shevchenko, R. L. Brods kaya, I. V. Bils kaya, Yu. V. Kobzeva, V. Dm. Lyakhnitskaya

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg

The paper deals with intergrowth boundaries of mineral grains in igneous rock in terms of their geometry, crystallography and energy accumulated in the course of ontogenesis of individuals and their aggregations. So, all the geometric features of the boundaries, such as the area, length, angular relationships, can be obtained in flat cross-sections of mineral aggregates or in petrographic thin sections, which are used to diagnose rock-forming and accessory minerals as well as rocks. Crystallographic identification of the boundaries of mineral individuals can also be measured and calculated for most of the boundaries in thin sections; sometimes the characteristic of flat cross-sections of mineral grains can be used according to the degree of cross-section contours' approximation to idiomorphic or xenomorphic forms. The energy characteristic of the mineral aggregate internal boundaries can be estimated indirectly as a result of calculating the projection of a unit cell of the mineral grain's crystal lattice on the plane of the individual's boundary. Each of these methods of consideration and characteristics of individual's boundaries and intergrowth's boundaries in the aggregate is a source of information for the restoration of comparative conditions for the mineral aggregate formation, ontogenesis.

Keywords: mineral aggregate, mineral individuals, mineral grains, boundaries, geometric, crystallographic and energy characteristics of the boundaries.

Введение

Под границей минерального индивида в поликристаллическом минеральном агрегате понимается объемная фаза кристаллической решетки минерального зерна, где прерывается трансляция элементарной ячейки. Граница минерального зерна в агрегате горной породы, как и поверхностный слой «идеального» кристалла, имеет структуру иную, чем структура кристаллической решетки. Благодаря своей структуре, отличающейся от структуры основного объема кристаллической решетки, граница или граничный слой «защищает» этот объем от разрушения в каком-то диапазоне термодинамических и механических условий функционирования. Граница содержит некоторое количество ненасыщенных связей. Эта особенность повышает энергоемкость границы [3, 5, 10, 11, 12, 13] минерального индивида по сравнению с энергоемкостью внутренних участков кристаллической решетки и энергоемкостью габитусных граней идиоморфных кристаллов, имеющих низкие кристаллографические символы и высокую атомарную плотность. За счет сравнительно более высокой энергоемкости границ срастания минеральных зерен обеспечивается мобильность, миграци-

онная способность внутренних границ минерального агрегата в тех случаях, когда возникает необходимость адаптировать минерально-петрографическую систему — агрегат — к меняющимся термодинамическим (геологическим) условиям функционирования.

Изменение размеров (объема) кристаллов в процессе их роста или растворения происходит не только с разной скоростью в различных термодинамических условиях, но и с образованием разной внешней морфологии, даже при сохранении основного состава и кристаллического строения минерального вещества. Наиболее ярким примером этого утверждения являются порфиновые (порфировидные) и равнозернистые горные породы. Так, в порфиновых породах вкрапленники минералов идиоморфны, тогда как индивиды тех же минералов в массивных горных породах ксено- и аллотриоморфны. Без особенных пояснений принято считать, что вкрапленники растут в условиях так называемой свободной кристаллизации, т. е. в процессе синтеза и роста их окружает достаточное пространство и наличие необходимого для синтеза и роста субстрата. В породах с массивной текстурой агрегата рост кристаллов в твердом состоянии стеснен близким рас-

положением других минеральных зерен. Вместе с тем известны и описаны минеральные агрегаты метасоматических пород, где идиоморфные метакристаллы — следствие поздних процессов — содержат включения ранее образовавшихся индивидов и субагрегатов окружающей эти кристаллы матрицы. Понятно, что в таких случаях ограничение растущих кристаллов контролируется скорее скоростью кооперативного процесса, чем существованием свободного(?), «не занятого» другими минеральными индивидами или агрегатами пространства. Идиоморфизм минеральных индивидов — свойство конвергентное.

Различная морфология минеральных индивидов визуально определяется наличием в их ограничении разноразно ориентированных границ относительно собственной кристаллической решетки зерен (кристаллов). Ориентировка границ минеральных индивидов относительно собственных осей симметрии, т. е. ориентировка границ, аккумулирующих какой-то запас энергии, зависит от энергетических потенциалов процессов минералообразования и матрицы кристаллизации, локально — от взаимодействия энергии фронтов кристаллизации соседних минеральных зерен [2]. Наше внимание сейчас сосредоточено на границах индивидов и на комплексе границ срастания минеральных зерен в агрегате, поскольку коллективный рост минеральных зерен или рост и морфология индивидов при ансамблевой, коллективной кристаллизации имеет некоторые особенности по сравнению с ростом индивидов, образованных в условиях свободной кристаллизации.

Напомним, что сочетание границ, принадлежащих одному индивиду, составляет и его объем (размеры), и морфологию. Комплекс всех границ в минеральном агрегате представляет собой внутреннее строение минерального агрегата, «каркас» его структуры и текстуры. В этом заключается первостепенная важность всех границ в горной породе для понимания и моделирования морфологии минеральных индивидов и закономерностей их агрегации, формирования строения горных пород. «Конечная» наблюдаемая морфология минеральных зерен в агрегате определяется термодинамическими процессами завершающих стадий их агрегации при образовании горной породы, а также устойчивостью границ, сформированных на более ранних этапах пороодообразующих процессов (резервом их устойчивости).

Обсуждение проблемы

Существует несколько аспектов описания внутренних границ минерального агрегата: 1) геометрический (стереометрический); 2) кристаллографический; 3) энергетический и 4) генетический.

Геометрический или стереометрический аспект включает рассмотрение и метрику линейных, площадных, объемных и угловых параметров строения агрегата. Здесь подразумеваются максимальный, минимальный и средний размеры зерна (зерен), площадь границ минерального индивида, суммарная площадь границ в минеральном агрегате всех зерен одного минерала и всех зерен, составляющих минеральный агрегат. Отсюда следуют понятия объемной формы минеральных индивидов в терминах, оценивающих их изометричность или анизометричность, собственно объем минеральных индивидов — гранулометрический и модальный состав агрегата (доля зерен каждого минера-

ла в анализируемом объеме агрегата), площадь поверхности зерна, удельная площадь поверхности (поверхность зерна, отнесенная к его объему), ориентированность границ индивидов в пространстве минерального агрегата¹. Здесь же возможны измерения углов между границами минеральных зерен, между направлениями спайности и кристаллооптическими осями зерен.

В стереометрическом анализе, выполняемом по плоским срезам или шлифам, существует и такая характеристика строения минеральных агрегатов, как общая протяженность внутренних границ. Как и другие измеряемые структурные и текстурные характеристики горных пород, она основана на положении о том, что *отношения количества и размеров минеральных зерен, наблюдаемых в плоскости случайных сечений, пропорциональны отношению тех же характеристик в объеме*. Это положение следует из недоказанной теоремы Хакера, но именно так более 150 лет в петрографической практике происходит оценка модального состава горных пород по плоским срезам или в петрографических шлифах.

Кристаллографический аспект описания и изучения границ в горной породе подразумевает рассмотрение сочетания границ, принадлежащих каждому из минеральных индивидов в качестве образующих их морфологию. Кристаллографическая квалификация границ минеральных индивидов осуществляется по степени приближения их части или комплекса единичного (каждого) зерна к идиоморфным или габитусным контурам. Последние детерминируются воздействием условий кристаллизации (в том числе особенностями онтогенеза при кристаллизации ансамбля минеральных зерен) на комплекс границ индивидов минерального агрегата. Кристаллографический подход в определении формы зерен как индивидов в минеральном агрегате (по степени идиоморфизма индивидов) нашел отражение в физиографических названиях структуры магматических пород: панидиоморфнозернистая, гипидиоморфнозернистая или аллотриоморфнозернистая.

Поскольку речь идет о минеральных зернах разной степени идиоморфизма, их границы могут характеризоваться, например, кристаллографическими индексами Миллера. Расчет или определение в шлифах кристаллографических индексов границ не всегда возможны и достаточно трудоемки, даже с некоторыми упрощениями и, как следствие упрощений, с погрешностями, но вполне реальны. Ограничения связаны с ориентировкой границ относительно плоскости их сечения шлифом. Мы считаем, что погрешности носят характер систематических ошибок. Например, регистрация положения кристаллооптических осей минеральных зерен совместно с доступными для визуализации или измерения координат кристаллографическими направлениями (спайности или легко определяемыми габитусными гранями) одновременно с такими

¹ Граница минерального зерна в агрегате рассматривается в двойной ориентировке: относительно собственной кристаллической решетки и относительно других границ, т. е. имеет ориентированность и в пространстве. Значительная часть границ, имеющих одинаковую или близкую ориентировку в пространстве минерального агрегата, создает директивность в его строении, которая может внести свой вклад в сланцеватую или полосчатую текстуру породы.

параметрами, как угол (углы) между осями оптической индикатрисы с одной стороны и кристаллической решеткой минерала с другой, делает последующие расчеты индексов плоских границ минеральных индивидов в агрегате вполне доступной операцией.

Энергетический аспект содержания понятия границы минерального индивида состоит в следующем. Граница минерального индивида в поликристаллическом агрегате, любой ее участок, представляет собой краевую дислокацию кристаллической решетки. Как краевая дислокация граница зерна содержит некоторое количество энергии. Это количество дифференцирует наблюдаемые границы роста/растворения или срастания индивидов в агрегате на энергонасыщенные или энергоемкие. В свою очередь, энергоемкость или энергонасыщенность границы минерального зерна [2, 3, 5, 12, 13] коррелирует со скоростью кристаллизации и миграции границ и соответствует термодинамическим условиям процесса формирования и среды функционирования. Особенно важной характеристикой границы является структура краевой дислокации, как и поверхностная энергия. Прямые измерения структуры и поверхностной энергии границ также весьма затруднительны. Опосредованная оценка этих характеристик с систематической погрешностью, постоянной в пределах петрографического шлифа, может осуществляться с использованием упомянутой выше процедуры определения ориентировки и расчета кристаллографических символов границ минеральных зерен или границ их срастания в полнокристаллическом агрегате. Использовать эти оценки, но не их абсолютные значения, могут *исключительно* в сравнительных целях. Подробная методика и алгоритм расчета опубликованы в статье [4].

Генетический и/или онтогенетический аспект интерпретации границ состоит в совокупности трех выше-названных способов оценки для характеристики границ индивидов, сформированных в условиях коллективного роста и срастаний зерен в минеральном агрегате. Рассмотрение каркаса структуры представляет собой основание для дифференцированных генетических интерпретаций формирования горной породы в целом или отдельных ее стадий.

Отметим, что все вышесказанное относится к исследованию минеральных границ, наблюдаемых в области видимого участка спектра и размеров кристаллов не меньше чем 30 мкм, т. е. к наблюдениям и измерениям в шлифах — при стандартной толщине 0.03 мм — с увеличениями, доступными в оптическом поляризационном микроскопе. Однако границы твердого тела имеют огромное значение в технике и изучаются более тонкими и прецизионными методами [7, 9, 10, 16]. С точки зрения физики твердого тела граница минерального зерна, называемая в большинстве публикаций «поверхность» или «поверхностный слой», обладает структурой, где рассматриваются ионно-электронная составляющая, «дно», «потолок» и адсорбат слоя. В некоторых работах утверждается, что любое химическое или минеральное соединение, наблюдаемое в виде твердого тела, имеет две фазы: границу и объем. Известно также, что моноэлементные соединения, например алмаз, германий и кремний, несмотря на тождественность их кристаллической решетки, обладают границами разного строения. В соответствии с этим они имеют габиту-

рные грани разной поверхностной энергии, т. е. строение поверхностей их кристаллов (алмаза, кремния и германия) различно.

Терминологические различия — граница или поверхностный слой — произошли, скорее всего, вследствие несколько различающихся объектов изучения. Так, в петрографии обсуждаются границы срастания минеральных зерен в горной породе. При этом используется видимая область спектра, петрографические шлифы и поляризационный микроскоп. Исследуются срастания твердого/твердое. В физике и химии твердого тела изучается и моделируется структура поверхности кристалла, как правило, это граница между твердым телом и жидкостью или газом (воздухом). Размерность рассмотрения физических, как и химических, моделей составляет нанометры и их доли [7].

И минералог, и петрограф, говоря о границе зерен в минеральном агрегате, имеют в виду не открытую границу или поверхность кристалла, т. е. границу кристалла или твердого тела с воздухом, а границу срастания «кристалл/кристалл», или «твердое тело/твердое тело». Энергии обеих краевых дислокаций в минеральном агрегате, не просто контактирующих друг с другом, а «сросшихся» в агрегате зерен, условно компенсируют друг друга. Однако такая «компенсация» или устойчивость при агрегации минеральных индивидов не является ни энергетическим балансом, ни силовым равновесием двух «сросшихся» границ. Отсутствие равновесия, или мера неравновесности, на границе срастания минеральных зерен сказывается в поведении внутренних границ при последующем функционировании системы, например при поступлении энергетического импульса в агрегат. «Суммирование» энергии импульса с энергетическим резервом «неравновесности» на границах срастания минеральных зерен, как и с энергией дефектов кристаллической решетки, вызывает миграцию границ, которая выражается в перемещении границ в пространстве агрегата, в увеличении площади границ при росте или их уменьшении при растворении, а также при изменении ориентировки границы относительно кристаллической решетки зерна. Все сказанное есть перечень признаков адаптации минерального агрегата к меняющимся термодинамическим условиям существования.

Генетический (онтогенетический) аспект изучения границ минеральных зерен и кристаллов является традиционным [5, 8, 11]. Так, достаточно определенно и лаконично о роли кристаллообразующих поверхностей писал М. Ю. Поваренных: «Вся история развития минерала от зарождения до распада запечатлена в его поверхностях, сам кристалл создается их перемещением и по существу является суперпозицией траекторий этого перемещения. Любая точка внутри него была в определенный момент времени точкой его былой поверхности» [11, с. 21]. Без пояснений и некоторых комментариев с этим положением трудно согласиться. Конечно, каждая точка растущего кристалла или фронта его кристаллизации оказывается внутри его объема, но свойства «точки» на фронте кристаллизации и в пределах его объема существенно различны, поскольку различны структура и энергия поверхностного слоя и любого равновеликого участка объема кристалла или кристаллического зерна. В этой связи оценка энергии границ зерен, в том числе на участках их срастаний, является

информативной онтогенической и важной прогнозной характеристикой строения минерального агрегата.

Говоря о прогнозной характеристике строения минерального агрегата, мы имеем в виду его свойства или поведение при функционировании. Прежде всего речь идет о прочности агрегата при любой дезинтеграции — техногенной или естественной. Первыми при дезинтеграции «раскрываются» так называемые гладкие границы срастания зерен. Это наименее шероховатые или извилистые границы, имеющие в своем контуре минимальное количество углов, как выпуклых, так и входящих. Чаще всего такие границы встречаются среди зерен, ограненных *габитусными* гранями, обладающими наименьшей поверхностной энергией, т. е. наиболее энергонасыщенными. Сбалансированную поверхностную энергию могут иметь границы срастания зерен в минеральных агрегатах завершающих стадий перекристаллизации. Гладкие границы минеральных индивидов, обычно энергонасыщенные, лучше защищают их объем (по сравнению с энергоемкими границами) и последними поддаются химическим преобразованиям: дольше растворяются и трансформируются.

Это свойство внутренних границ горных пород при их функционировании отметил Г. Л. Поспелов [14], считая, что такой процесс, как «метасоматоз можно определить как форму работы поверхностной энергии» [14, с. 65]. Собственные наблюдения он суммировал с исследованиями А. С. Ахматова [1] и многих других [15]. Так, преломляя и обобщая представления «механохимии или химии граничных твердых фаз и дислокаций кристаллических решеток» [14, с. 65; 15], Г. Л. Поспелов заключил, что «многие минеральные превращения являются не столько химическими, сколько физическими явлениями...» [14, с. 66]. Из развития этих же соображений следует, что самой высокой прочностью обладают агрегаты, в которых границы срастания минеральных зерен не скомпенсированы или не сбалансированы по поверхностной энергии. Отмечена высокая абразивность в агрегатах, где внутренние границы шероховатые, удельная поверхность и, следовательно, поверхностная энергия минеральных зерен и границ агрегатов выше, чем в тех, где размер зерен такой же, но границы представлены гладкими поверхностями.

Заключение

Известно [6], что в «памяти» минеральных индивидов остается история их образования и преобразований. Чаще всего онтогенический анализ минеральных зерен осуществляется по наблюдениям их анатомического строения (структур распада твердых растворов, зональности и секториальности, газово-жидких и минеральных включений). Анатомия минеральных зерен, их морфология — все имеет значение и содержит информацию для восстановления онтогенеза не только индивида, но и их ансамбля, агрегата.

Онтогенический анализ минеральных агрегатов только обогатится своими возможностями за счет включения в комплекс методов исследования внутренних границ агрегатов и субграниц минеральных зерен. Внутренние границы хранят признаки «энергетической» и «кинетической» истории становления горной породы и, таким образом, являются инструментом онтогенического анализа минеральных агрегатов.

Литература

1. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. Москва: Физматгиз, 1963. 472 с.
2. Бродская Р. Л. Морфология минеральных индивидов в магматических горных породах и соотношение взаимности Онзагера // Записки Российского минералогического общества. 2018. Т. 147. № 5. С. 96—109.
3. Бродская Р. Л. Термодинамические (кинетические) критерии формирования и эволюции структуры минеральных агрегатов // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1988. Т. 117. № 5. С. 623—633.
4. Бродская Р. Л., Макагонов Е. П. Определение пространственной ориентировки кристаллических индивидов при микроструктурном анализе и перспективы его использования в стереометрической петрографии // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1990. Т. 119. № 4. С. 84—93.
5. Бродская Р. Л., Марин Ю. Б. Энергетическая характеристика внутренних границ и технологические свойства минерального агрегата // Доклады Академии наук. 1995. Т. 344. № 5. С. 654—656.
6. Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогения минералов: Индивиды. М.: Наука, 1975. 339 с.
7. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
8. Жабин А. Г. Онтогения минералов. Агрегаты. М.: Наука, 1979. 275 с.
9. Зенгуил Э. Физика поверхности. М.: Мир, 1990. 536 с.
10. Новое в исследовании поверхности твердого тела: Сб. ст. В 2 т. / Ред.: Т. Джайядевая, Р. Ванселов. М.: Мир, 1977. Т. 1. 315 с.
11. Поваренных М. Ю. Значение понятия «поверхность» при рассмотрении основного объекта минералогии: Теория минералогии: Сб. науч. тр. / Отв. ред. Д. П. Григорьев, Н. П. Юшкин. Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, 1988. С. 20—22.
12. Пономарев В. С. Латентные напряжения в геологической среде: Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле к 40-летию создания М. В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Материалы докладов Всерос. конф. В 2 т. 2009. Т. 1. С. 70—74.
13. Пономарев В. С. Энергонасыщенность геологической среды // Тр. Геол. института. 2008. № 582. С. 1—379.
14. Поспелов Г. Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1973. 355 с.
15. Химия твердого состояния. М.: Иностр. лит., 1961. 543 с.
16. Хофман Р. Строение твердых тел и поверхности. М.: МИР, 1990. 216 с.

References

1. Ahmatov A. S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya* (Molecular physics of boundary friction). Moscow: Fizmatgiz, 1963, 472 pp.
2. Brodskaya R. L. *Morfologiya mineral'nykh individov v magmaticheskikh gornyykh porodakh i sootnoshenie vzaimnosti Onzagera* (The morphology of mineral individuals in igneous rocks and the Onzager reciprocity ratio). *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2018, V. 147, No. 5, pp. 96—109.
3. Brodskaya R. L. *Termodinamicheskie (kineticheskie) kriterii formirovaniya i evolyutsii struktury mineral'nykh agregatov* (Thermodynamic (kinetic) criteria for the formation and evolution of the structure of mineral aggregates). *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*, 1988, V. 117, No. 5, pp. 623—633.

4. Brodskaya R. L., Makagonov E. P. *Opredelenie prostranstvennoi orientirovki kristallicheskih individov pri mikrostrukturnom analize i perspektivy ego ispol'zovaniya v stereometricheskoi petrografii* (Determination of the spatial orientation of crystalline individuals in microstructural analysis and the prospects for its use in stereometric petrography). *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obschestva*, 1990, V. 119, No. 4, pp. 84–93.
5. Brodskaya R. L., Marin Yu. B. *Energeticheskaya harakteristika vnutrennih granits i tehnologicheskie svoystva mineral'nogo agregata* (energetic characteristics of internal boundaries and technological properties of a mineral aggregate). *Doklady Earth Sciences*, 1995, V. 344, No. 5, pp. 654–656.
6. Grigorev D. P., Zhabin A. G. *Ontogeniya mineralov: Individy* (Ontogeny of minerals: Individuals). Moscow: Nauka, 1975, 339 pp.
7. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* (Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies). Moscow: Fizmatlit, 2007, 416 pp.
8. Zhabin A. G. *Ontogeniya mineralov. Agregaty* (Ontogeny of minerals. Aggregates.). Moscow: Nauka, 1979, 275 pp.
9. Zenguil E. *Fizika poverhnosti* (Physics of the surface). Moscow: Mir, 1990, 536 pp.
10. *Novoe v issledovanii poverhnosti tverdogo tela* (The new in the study of the surface of a solid). Collection of articles. Ed.: T. Dzhaiyadevaiya, R. Vanselov. V. 1, Moscow: Mir, 1977, 315 pp.
11. Povarennyh M. Yu. *Znachenie ponyatiya "poverhnost'" pri rassmotrenii osnovnogo ob'ekta mineralogii. Teoriya mineralogii* (The meaning of the term "surface" when considering the main object of mineralogy. Theory of mineralogy. Collection of scientific papers). Ed. D. P. Grigorev, N. P. Yushkin. Leningrad: Nauka, 1988, pp. 20–22.
12. Ponomarev V. S. *Latentnye napryazheniya v geologicheskoi srede. Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle k 40-letiyu sozdaniya M. V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN: materialy dokladov Vserossiiskoi konferentsii. V 2 tomah* (Latent stresses in the geological environment. Tectonophysics and topical issues of Earth sciences to the 40th anniversary of the creation by M. V. Gzovskii of the Laboratory of Tectonophysics at the Institute of Physics of the Russian Academy of Sciences: proceedings of the All-Russian Conference. In 2 volumes), 2009, V. 1, pp. 70–74.
13. Ponomarev V. S. *Energonasyschennost' geologicheskoi sredy* (Energy saturation of the geological environment). *Trudy Geologicheskogo instituta*, 2008, No. 582, pp. 1–379.
14. Pospelov G. L. *Paradoksy, geologo-fizicheskaya suschnost' i mehanizmy metasomatoza* (Paradoxes, geological and physical nature and mechanisms of metasomatism). Novosibirsk: Nauka, 1973, 355 pp.
15. *Himiya tverdogo sostoyaniya* (Solid state chemistry). Moscow: Foreign Literature, 1961, 543 pp.
16. Hofman R. *Stroenie tverdyh tel i poverhnosti* (The structure of solids and surfaces). Moscow: Mir, 1990, 216 pp.