УДК 552.321.1: 552.08

МЕТАСТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р.Н. Соболев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 10.04.16

Метастабильное состояние соответствует одному из минимумов термодинамического потенциала системы при заданных внешних параметрах. Существование метастабильных состояний связано с затрудненностью начальной стадии фазового перехода первого рода. Превращение одной фазы в другую требует перестройки системы и преодоления барьера энергетически невыгодных промежуточных состояний. Если этого не происходит, то в области, где абсолютно устойчивой является новая фаза, возможно метастабильное существование старой фазы. Системы, которые имеют большую вязкость, могут длительное время существовать в метастабильном состоянии. При медленном охлаждении во всей метастабильной области возможен частичный или полный распад расплава. Кривая спинодаль отделяет метастабильную область от области полной неустойчивости. Несоразмерность кластеров разных минералов является причиной распада силикатных расплавов. Природные стекла и минералы в метастабильном состоянии могут существовать миллионы лет. В пределах единого зерна переход в стабильное состояние происходит неодновременно.

Ключевые слова: кластер, зародыш, стекло, флуктуация, фазовые переходы, твердые растворы.

Sobolev R.N. Magmatic systems metastable state. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2017. Volume 92, part 2. P. 83–89.

Metastable state corresponds to one of system`s thermodynamic potential minimum at given ambient parameters. Metastable states existing is related to difficulties at initial stage phase transition of the 1 order. Transformation one phase to another asks system restructuring and overcoming energetic barrier of disadvantage intermediate states. If this does not occurs, then in the region there absolute stable is a new phase is possible metastable existing the old phase. System with high viscosity can long time stay in metastable state. At slow cooling partial or complete decay of a melt is possible. Spinodal curve separate metastable region from region of total instability. Different minerals cluster disproportion is the reason for silicate melts. Natural glasses and minerals in metastable state can exist for million years. In the cadre of unique grain transformation to stable state occurs nonsimultaneous.

Key words: cluster, embryo, glass, fluctuation, phase transitions, solid solutions.

Метастабильное состояние – это состояние неполного равновесия макроскопической системы, соответствующее одному из минимумов ее термодинамического потенциала при заданных внешних параметрах. Однородная система в метастабильном состоянии может существовать длительное время, если удовлетворяет условиям устойчивости термодинамического равновесия относительно небольших вариаций температуры, давления и др. Когда флуктуация параметров становится значительной, система переходит в новое устойчивое состояние и, в конце концов, в максимально устойчивое состояние (точка с координатами Φ_1, x_1 на рис. 1).

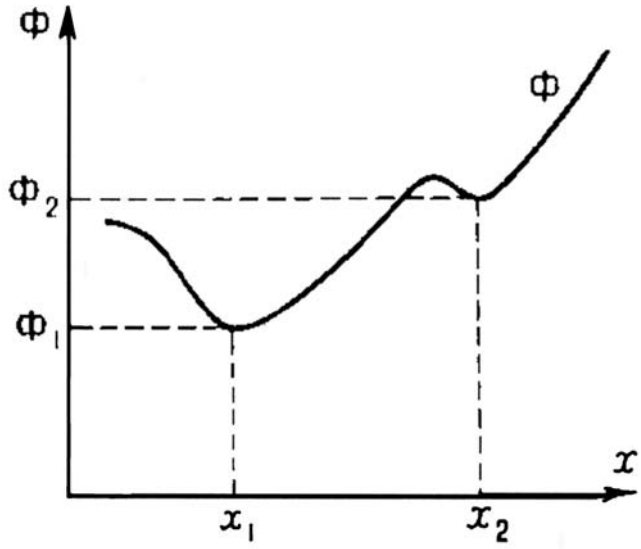


Рис. 1. Метастабильное и стабильное состояние в координатах Ф – x. $\Phi_1(x_1)$ – абсолютный минимум функции Ф (ею могут быть потенциалы F или G), стабильное состояние; $\Phi_2(x_2)$ – относительный минимум функции – метастабильное состояние; x – переменный физический параметр (например, объем V), другие параметры постоянны

Для однокомпонентной системы энергия Гиббса $\Phi(T, P)$ (или химический потенциал $\mu(T, P) = \Phi/n$, n – число частиц в системе) изображается поверхностью с самопересечением. На линии пересечения химических потенциалов двух фаз $\mu'(T, P) = \mu''(T, P)$ возможно равновесное сосуществование этих фаз. Точка *s* на рис. 2 – это след такой линии на плоскости P = const. Метастабильному состоянию двух фаз соответствуют участки *sa*' и *sb*'.

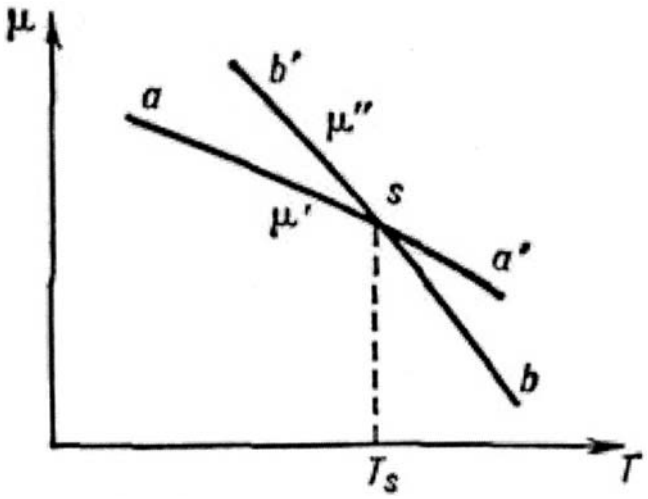


Рис. 2. Сечение диаграммы состояний плоскостью P = const, *s* – точка равновесия двух фаз

Возникновение метастабильного состояния

Существование метастабильных (перегретых, переохлажденных) состояний связано с затрудненностью начальной стадии фазового перехода первого рода. Он начинается с образования в исходной гомогенной фазе отдельных микрообъемов, имеющих другой состав и структуру. Прерывистый характер фазового перехода ($dS \neq 0$, $dv \neq 0$; здесь S – удельная энтропия, v — удельный объем) исключает возможность его реализации одновременно во всем объеме системы.

Процесс перехода метастабильного состояния в стабильное – это образование небольших областей (микрообъемов) новой фазы в старой фазе. Мера метастабильности состояния (время его существования) $\tau = 1/A$, где A – полная вероятность перехода из данного состояния в другое состояние с меньшей энергией. Чем меньше A, тем больше τ, и состояние более стабильно. При переходе системы из N частиц из метастабильного состояния в стабильное энергетический выигрыш составляет $\Phi v = N(\mu_I - \mu_{II})$, где μ_I и μ_{II} – химические потенциалы частиц в I и II фазах как функции T и P.

Распад метастабильного состояния

Метастабильное состояние системы превращается в устойчивое состояние в результате процесса флуктуационного возникновения новой фазы внутри старой фазы. Число таких областей вначале невелико, и каждая из них существует независимо от других.

Зародыш растет тогда, когда его радиус (R) больше радиуса критического зародыша (r^*). Этот процесс сопровождается уменьшением термодинамического потенциала, потому что свободная энергия Гиббса (при постоянных P и T) гомогенной системы, находящейся в метастабильном состоянии, больше, чем у системы, состоящей из двух сосуществующих фаз, образовавшихся при распаде этой исходной системы. Если это кристаллический зародыш, то он растет вследствие присоединения атомов и кластеров. Если это микрообъем отликвировавшей жидкости, то его рост происходит в результате коалесценции. И в том и в другом случае это переход из одного стабильного состояния в другое стабильное состояние. Рост зародышей новой фазы сопровождается уменьшением суммарной поверхности.

Процесс образования новой фазы состоит из нескольких стадий: 1) ожидания начала фазового перехода (локальное термодинамическое равновесие в микрообъеме); 2) зарождения новой фазы (флуктуация и отсутствие локального термодинамического равновесия); 3) роста новой фазы (отсутствие локального термодинамического равновесия); 4) установления конечного равновесия (локальное термодинамическое равновесие).

Работа (W) образования стабильного зародыша сферической формы равна

$$W = 16\pi\sigma^3/3(P_з - P_{сф})^2,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе фаз; $P_з$ и $P_{сф}$ – давления в критическом зародыше новой фазы и в старой фазе. Вместо разностей давлений можно использовать величину переохлаждения или перегрева ($T - T_0$) при заданном давлении, или разность химических потенциалов ($\Delta\mu$) метастабильной и стабильной фаз. Тогда

$$W = 16\pi\sigma^3v^2/3(\Delta\mu)^2,$$

где v – удельный объем стабильной фазы.

Для определенности обычно предполагают, что система, находящаяся в метастабильном состоянии, прорелаксирована по всем признакам, кроме тех флуктуационных мод, которые приводят к возникновению жизнеспособных зародышей. Это значит, что характерное время ожидания распада метастабильной системы больше остальных времен релаксации (концентрационной, температурной и др.) (Ландау и др., 1976).

При образовании зародыша возникает поверхность раздела. Энергетические затраты (Φ_S) на образование этой поверхности пропорциональны числу частиц на поверхности: $\Phi_S = \alpha S$, где α – коэффициент поверхностного натяжения. Минимальную поверхность ($S = 4\pi R^2$) при заданном объеме ($V = 4\pi R^3/3$) имеет сферический зародыш радиуса R. Общее изменение энергии $\Phi(P, T; R)$ для такого зародыша равно

$$\Phi = \Phi_S - \Phi_V = 4\pi R^2\alpha - 4\pi R^3 n(\mu_I - \mu_{II})/3.$$

Функция $\Phi(R)$ имеет максимум при $R = r^*$, $r^* = 2\alpha/n(\mu_I - \mu_{II})$, где r^* – радиус критического зародыша. Вблизи линии фазового перехода разность $\mu_I - \mu_{II}$ мала, а величина r^* велика по сравнению с межатомным расстоянием. Величина r^* рассчитывается по формуле:

$$r^* = 2\sigma T_к / L\Delta T,$$

где σ – удельная поверхностная энергия, $T_к$ – температура кристаллизации, L – теплота кристаллизации, выделяющаяся при фазовом переходе расплав – кристалл, ΔT – переохлаждение, необходимое для образования устойчивого и способного к росту зародыша. Вероятность флуктуационного образования критического зародыша

$$\sim \exp [-\Phi(r^*)/kT].$$

Критический размер зародыша

Зародыш, имеющий критический радиус, состоит из постоянного числа атомов. Он находится в состоянии неустойчивого равновесия с окружающей средой. Когда число атомов в зародыше увеличивается, он приобретает способность к росту; когда их число уменьшается, зародыш становится неустойчивым. Для оценки размера критического зародыша учитывается соотношение объемной и поверхностной свободной энергии при образовании зародыша новой фазы. Для сферического зародыша изменение свободной энергии (ΔG) при кристаллизации:

$$\Delta G = 4\pi R^2\gamma + 1/3\ \pi R^3 \Delta G_v.$$

Здесь γ – удельная поверхностная энергия, ΔG_v – изменение свободной энергии при кристаллизации единицы объема, R – радиус зародыша; γ и ΔG_v не зависят от R и имеют разные знаки. Термодинамическим критерием существования стабильного критического зародыша радиуса r^* является равенство этих членов.

Число зародышей, превращающихся в единицу времени в единице объема системы в зародыши с размером больше критического (I_c), равно: $I_c = \omega \exp [-\Phi(r^*)/kT]$. Предэкспоненциальный множитель зависит от кинетических характеристик системы. При росте зародышей изменяется отношение площади поверхности зародыша к объему. Чем оно меньше, тем устойчивее зародыш. На скорость образования зародышей влияет кинетический фактор: свобода перемещения частиц относительно друг друга обусловливает скорость образования и рост зародыша. Этот процесс контролируется вязкостью.

Кинетика фазовых переходов

Кинетика фазовых переходов исследует процессы возникновения новой фазы. Эти процессы различны для фазовых переходов первого и второго рода: в первом случае фазы резко отличаются друг от друга, а во втором случае различия небольшие. Превращение одной фазы в другую при фазовом переходе первого рода требует перестройки системы и преодоления барьера энергетически невыгодных промежуточных состояний. Если этого не происходит, то в области, где абсолютно устойчивой является новая фаза, возможно существование метастабильного состояния старой фазы. Воздействуя на систему, мы изменяем ее полную внутреннюю энергию. Это происходит с некоторой конечной скоростью. Поэтому для осуществления фазового перехода во всем объеме вещества требуется некоторый промежуток времени.

При фазовом переходе второго рода внутренняя энергия не меняется. Скачкообразно изменяются теплоемкость, коэффициент теплового расширения и т.п., также изменяется симметрия вещества. Описание фазового перехода второго рода как следствие изменения симметрии дается теорией Л. Ландау (Ландау и др., 1976). Кинетика фазовых переходов второго рода в значительной мере зависит от существования в системе гидродинамических голдстоуновских мод (степеней свободы), характеризуемых локальными значениями термодинамических параметров (температуры, давления и др.), меняющихся во времени и пространстве (Фолмер, 1986). Метастабильность – одна из составляющих: мода → флуктуации → теплопроводность (диффузия). Математическое описание связи этих состояний приведено в работе (Паташинский и др., 1982).

Расплав

В зависимости от температуры расплав имеет разное строение (разную степень упорядоченности). Наиболее высокотемпературный и наиболее разупорядоченный расплав – это расплав ионного типа: атомы в нем не связаны друг с другом. Такой расплав имеет минимальную вязкость. Он существует при температуре, близкой к температуре кипения. При понижении температуры расплав упорядочивается: катионы образуют мостиковые связи с кислородом. При дальнейшем понижении температуры образуются кластеры. Чем ниже температура, тем из большего числа атомов состоит кластер (Гусев, 2007).

Распад расплава

Системы, имеющие большую вязкость, такие как алюмосиликатные расплавы, могут существовать очень длительное время в метастабильном состоянии. Процесс распада расплава происходит не всегда и не всегда он завершается полностью. Гораздо чаще существует метастабильная фаза, распад которой происходит только через очень большой промежуток времени в результате флуктуации. При этом свободная энергия системы уменьшается независимо от того, насколько мала эта флуктуация. Если при этом не происходит увеличения поверхностной или упругой энергии системы, исходная жидкая фаза разделяется на две фазовые области со скоростью, зависящей от скорости диффузии.

При медленном охлаждении во всей метастабильной области возможен частичный или полный распад. При быстром охлаждении распад может не осуществиться. В этом случае при новых параметрах сохранится расплав исходного состава (метастабильное состояние).

Возможность распада жидкости определяется ее исходным составом (попадает ли состав в область распада), внутренним строением, параметрами состояния, вязкостью, скоростью охлаждения и др. Распад происходит не мгновенно, для его реализации требуется время (время релаксации).

При охлаждении силикатных расплавов в них формируются элементы кристаллических решеток (кластеры) будущих минералов. Объемы кластеров разных минералов различаются, а их структуры несовместимы. Вследствие этого в расплаве формируются микрообласти, образованные кластерами с одинаковым или близким строением и объемом. Теория упорядоченности силикатных расплавов с позиций кристаллохимии разработана Н.В. Беловым (1968).

На рис. 3 представлена теоретическая диаграмма ликвации. На ней имеются две кривые: бинодаль (линия двухфазового равновесия) и спинодаль (граница термодинамической устойчивости). Они соприкасаются в критической точке (точка *i*), которая отвечает условию: $(\partial p/\partial V)_T = (\partial^2 p/\partial V^2)_T = 0$. В этой точке фазы находятся в термодинамическом равновесии и являются тождественными по свойствам. Кривая спинодаль отделяет метастабильную область от области абсолютной неустойчивости (поле внутри спинодали).

При температуре выше бинодали система представлена гомогенной жидкой фазой. Между кривыми бинодаль и спинодаль (и справа, и слева от точки *i*) в исходной жидкости происходит образование микрообъемов жидкости, составы которых

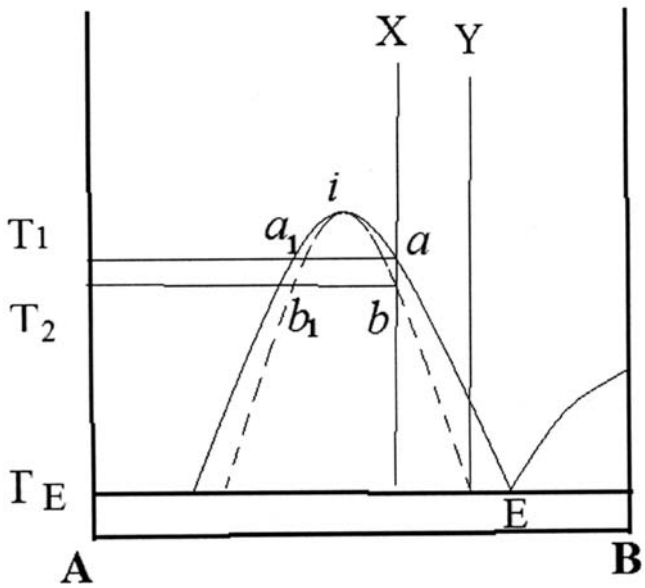


Рис. 3. Ликвация. *T* – температура, сплошная линия – бинодаль, пунктирная линия – спинодаль

отличаются от состава исходной жидкой фазы. В зависимости от кинетических параметров эти микрообъемы могут стать либо устойчивыми и продолжать расти, либо стать неустойчивыми. В поле внутри спинодали распад происходит всегда.

Сначала рассмотрим теоретическую диаграмму (рис. 3). Состав *X* при температуре T_1 находится на кривой бинодаль. В интервале температур $T_1 - T_2$ исходная гомогенная жидкая фаза неустойчива, и в ней в результате флуктуации зарождается новая жидкая фаза. Будет ли эта вновь образованная фаза расти, зависит от кинетических параметров состояния системы. При температуре ниже T_2 (поле внутри спинодали) всегда происходит распад исходной жидкой фазы на две жидкие фазы, составы которых значительно различаются. Составы этих фаз находятся на спинодали. Особое положение занимает состав *Y*. Распад жидкости такого состава может произойти только через бесконечно большой промежуток времени.

Природные расплавы и расплавы, с которыми выполняются эксперименты, всегда имеют вязкость и некоторый объем. Это налагает определенные ограничения при применении диаграмм для рассмотрения реальных процессов. Вязкость замедляет все процессы, и чем она выше, тем больше время релаксации: время, необходимое для перехода от одного состояния относительного равновесия (метастабильное состояние) к другому, прямо пропорционально вязкости. Поэтому метастабильные состояния широко представлены в магматических горных породах.

При остывании системы снижение температуры происходит во всем ее объеме. Поэтому система всегда сначала попадает на точку *i*, и, когда температура понизится, исходный состав обязательно распадается на два расплава, составы которых находятся на кривой солидуса. На рис. 3 видно, что чем ниже температура системы (чем дольше реализуется процесс распада), тем контрастнее состав образующихся фаз.

Так как силикатные расплавы имеют большую вязкость, то процесс распада в них происходит не сразу: необходимо время релаксации. Поэтому если охлаждение происходит достаточно быстро, то система будет находиться в метастабильном состоянии длительное время. При медленном охлаждении силикатного расплава ликвационный распад имеет место (Соболев и др., 2001 и др.). На рис. 4 показан результат ликвационного распада расплавов.

Стекло

Стекло сохраняет структуру расплава, при закалке которого оно образовалось. Чем выше температура, при которой произошла закалка расплава, тем более разупорядочено стекло (оно наследует неупорядоченность расплава) и тем медленнее в нем происходят процессы упорядочения (высокая вязкость стекла затрудняет диффузию).

Стекло в эффузивных породах сохраняется миллионы лет. Так, возраст содержащих стекло риолитов субвулкана Эльджурт-Сырт-Баш (Северный Кавказ) составляет около 5 млн лет (Старостин и др., 1999). Известны случаи, когда стекла сохраняются в породах, имеющих возраст более 300 млн лет (Афанасьев, Соболев, 1966; Соболев, 2004).

Существование стекол и твердых растворов алюмосиликатов и силикатов (метастабильное состояние) в течение многих миллионов лет показывает, что такое состояние природных объектов – это правило, а не исключение. Сохранение стеклами неупорядоченного состояния в течение длительного промежутка времени объясняется тем, что (1) закалялся высокотемпературный слабо упорядоченный расплав и (2) алюмосиликатные и силикатные стекла имеют очень высокую вязкость, вследствие чего процессы диффузии и упорядочения в них происходят чрезвычайно медленно. Существование очень древних стекол свидетельствует и об очень высокой температуре их существования, и об очень быстром охлаждении.

Кристаллизация

Фазовый переход первого рода расплав – кристалл осуществляется при охлаждении системы. Чтобы переход произошел, требуется, чтобы в данной нанообласти были и необходимое количество вещества, и соответствующее переохлаждение (Соболев, 2009а, б). В результате упорядочения расплава (переход из неустойчивого состояния в относительно устойчивое) в интервале температур ликвидус – субликвидус происходит образование и рост кластеров. При температуре субликвидуса образуются устойчивые и способные к росту зародыши (критические зародыши). Рост их происходит ниже температуры субликвидуса.

Минералы

При быстром остывании системы у зерен минералов сохраняется рыхлая кристаллическая решетка, свойственная кластерам (квазикристаллический тип расплава). Это позволяет кластерам других минералов, имеющих близкие объем и параметры решетки, встраиваться в решетку основного минерала. В результате образуются метастабильные минеральные фазы. Большинство минералов магматических горных пород находится в метастабильном состоянии. Типичным примером являются щелочные полевые шпаты. Самыми высокотемпературными, наименее упорядоченными и содержащими наибольшее количество примеси (альбит) являются санидины. Они метастабильны при параметрах земной поверхности и с течением времени переходят в более устойчивые ортоклазы, а затем в микроклины. При этом происходит упорядочение кристаллической решетки, в результате чего выделяется некогерентная примесь альбита (пертитовый распад). Ортоклазы тоже метастабильны. Стабильной

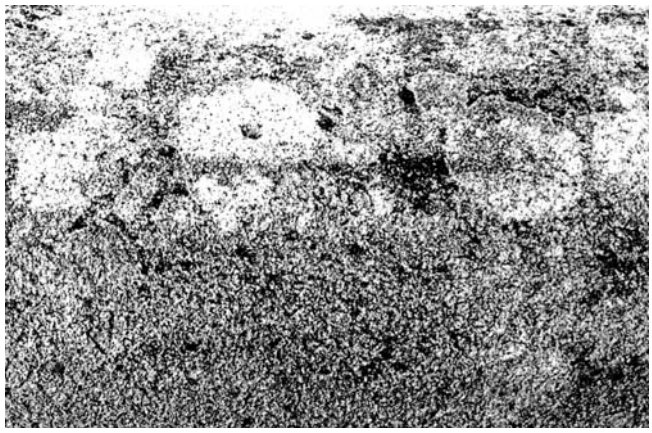


Рис. 4. Лейкократовые обособления в граните, образовавшиеся в результате распада исходного расплава. Составы обособления и гранита близки. Ширина фотографии 10 см

фазой является максимальный микроклин. Процесс упорядочения происходит неоднократно: несколько генераций пертитов распада (несколько сменяющих друг друга состояний относительной устойчивости). На рис. 5 показан перистеритовый распад плагиоклаза. Разная степень упорядоченности минералов установлена как в пределах единого магматического тела (Соболев и др., 2000), так и в разных участках одного зерна минерала (Соболев др., 2004, 2007). Известны примеры, когда полного упорядочения структуры щелочного полевого шпата не произошло за десятки и сотни миллионов лет (Соболев и др., 1959 и др.). Существование метастабильных минеральных фаз – это общая закономерность.

Большое количество вакансий и дефектов в структуре алюмосиликатов (особенно в их краевой части) позволяет некогерентным атомам и кластерам входить в кристаллическую решетку минерала-хозяина. При понижении температуры происходит упоря-

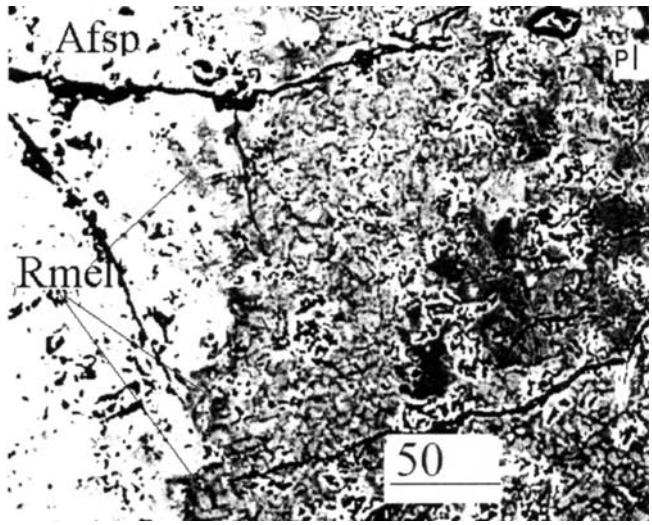


Рис. 5. Перистеритовый распад зерна плагиоклаза. При отжиге произошел распад на плагиоклазы разного состава (таблица). Гранодиорит, 1162°C, 200 часов. Длина черной линии 50 μm. Afsp – расплав щелочного полевого шпата, Rmel – расплав, образовавшийся в результате реакции расплава Afsp и зерна плагиоклаза (Pl)

дочение кристаллических решеток и минерала-хозяина и некогерентных кластеров. Это является причиной распада единой высокотемпературной фазы на две сосуществующие фазы. Экспериментально показано, что процесс упорядочения структуры может также происходить при повторном нагревании (отжиге) образца (Соболев, Мальцев, 2011, 2015). Это видно на рис. 5: при отжиге произошел перистеритовый распад. Химические составы образовавшихся фаз различаются не очень сильно (таблица).

Таблица химического состава фаз (плагиоклазов), образовавшихся в результате перистеритового распада исходного зерна плагиоклаза, %

№ анализа	Na_2O	Al_2O_3	$Si0_2$	K_2O	CaO	FeO_Σ	Сумма
2п, матрица	5,09	27,03	57,08	0,72	10,31	0,12	100,35
3с, вростки	6,90	26,80	54,62	0,67	9,70	1,25	99,93

Распад обусловлен различием в строении ячеек. В природных условиях перистеритовый распад происходит реже, чем пертитовый распад, так как он требует большей затраты энергии (Минералы, 2003). Флуктуация способствует распаду метастабильного твердого раствора. Чтобы произошел распад твердого раствора, необходимо выполнить работу (A) образования в исходной фазе (за счет ее вещества) новой фазы:

$$A = 1/3\ \sigma S,$$

здесь σ – свободная граничная энергия на единицу поверхности соприкосновения двух фаз, S – число частиц на поверхности новой фазы.

Заключение

В процессе роста и кластеров, и кристаллов атомы не успевают расположиться в их структуре строго закономерно. Образование метастабильной кристаллической фазы (неполный распад) является следствием негомогенности исходной жидкой фазы и ее быстрого охлаждения. В результате флуктуации в пределах единого кристалла одинаковые кластеры объединяются и из них формируются зародыши новой фазы: происходит переход системы из метастабильного состояния в стабильное. Причиной распада является несовместимость структуры вновь образованной кристаллической фазы со структурой минерала-хозяина. Некогерентные кластеры и атомы объединяются и формируют самостоятельную фазу. В результате в новых условиях единая метастабильная минеральная фаза распадается на несколько стабильных минеральных фаз. Распад метастабильной кристаллической фазы (структурное упорядочение) происходит очень медленно (миллионы лет). Метастабильное состояние стекол и минералов свидетельствует об очень высокой температуре их существования и очень быстром охлаждении.

ЛИТЕРАТУРА

Афанасьев Г.Д., *Соболев Р.Н.* Возраст гранитов Амантау и Сары-Адыр (Ц. Казахстан) и их реперное значение для границы франского и фаменского ярусов верхнего девона // Абсолютное датирование тектоно-магматических циклов и этапов оруденения по данным 1964 г. Тр. XIII сессии Комис. по определению абсолютного возраста геол. формаций / Ред. Г.Д. Афанасьев. М.: Наука, 1966. С. 248–254.

Белов Н.В. Попытки кристаллохимического вмешательства в специфические вопросы минералогии и петрографии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол. 1968. № 4. С. 78–90.

Гленсдорф П., *Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.

Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука. Физматлит, 2007. 416 с.

Ландау Л.Д., *Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 584 с.

Минералы. Т. V. Вып. 1. М.: Наука, 2003. 582 с.

Паташинский А.З., *Покровский В.А.* Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука, 1982. 381 с.

Соболев Н.Д., *Лебедев-Зиновьев А.А.*, *Назарова И.Н.* и др. Неогеновые интрузивы и домезозойский фундамент района Кавказских минеральных вод // Тр. ВИМС. Нов. сер. Вып. 3. М., 1959. 212 с.

Соболев Р.Н. Стекловатые породы эндоконтактовых фаций гипабиссальных гранитных массивов // Изв. Секции наук о Земле РАЕН. 2004. Вып. 12. С. 103–108.

Соболев Р.Н. Физико-химический анализ процессов, происходящих при остывании расплава. Статья 1. Строение расплавов, процессы зарождения и роста кристаллов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2009а. Т. 84, вып. 3. С. 72–84.

Соболев Р.Н. Физико-химический анализ процессов, происходящих при остывании расплава. Статья 2. Диаграммы состояния, формы кристаллов и формирование структур горных пород // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2009б. Т. 84, вып. 6 . С. 28–35.

Соболев Р.Н., Волкова Е.Н., Иванова Т.К. Зональность зерен щелочных полевых шпатов из риолитов жерла Эльджурт Сырт-Баш (Северный Кавказ) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2007. Т. 82, вып. 3. С. 60–63.

Соболев Р.Н., *Каплуник Л.Н.*, *Чжу Юн-фэн.* Структурная упорядоченность и химический состав K-Na полевых шпатов как показатель условий их кристаллизации и посткристаллизационных превращений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол. 2000. № 5. С. 54–61.

Соболев Р.Н., *Мальцев В.В.* Процесс образования расплава при нагревании кварц-полевошпатовых пород // Докл. АН. 2011. Т. 438, № 5. С. 671–674.

Соболев Р.Н., *Мальцев В.В.* Температурный интервал образования расплава при нагревании силикатных ми-

нералов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2015. Т. 90, вып. 2. С. 48–60.

Соболев Р.Н., *Шербакова М.Н.*, *Костина Р.И.* Жидкостная несмесимость в лавах вулкана Мунглу (Ц. Казахстан) // Докл. АН. 2001. Т. 379, № 4. С. 544–547.

Старостин В.И., *Кононов О.В.*, *Соболев Р.Н.*, *Юткин А.В.* Магматизм и оруденение Тырныаузского редкометально-полиметаллического центра // Изв. Секции наук о Земле. РАЕН. 1999. № 3. С. 102–116.

Фолмер М. Кинетика образования новой фазы. М.: Наука, 1986. 202 с.