

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МИНЕРАЛОВ ОРТОМАГМАТОВ НА ИХ РАЗМЕРНОСТИ

© 2018 г. О. К. Иванов

Размерности кристаллических индивидов минералов магматических пород являются важнейшим диагностическим параметром, позволяющим определять их условия кристаллизации. Новая парадигма петрологии – неравновесная петрология и систематика ортомагматов по составу и степени неравновесной кристаллизации основаны на размерах зерен (индивидов) минералов [Иванов, 2017, 2018]. Установленная ранее зависимость их размера от скорости кристаллизации расплава очевидна. В отличие от скорости кристаллизации влияние других параметров требует доказательств. Таким параметром является содержание минералообразующих компонентов в прородном расплаве.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Вопрос размерностей индивидов магматических (расплавных) пород был решен еще в самом начале становления петрографии как науки, когда Ф. Циркель в 1866 г. разделил магматические породы по возрасту и размерностям зерен. Среди молодых горных пород он выделял стекловатые, шлаковые и кристаллические, среди древних – порфиоровые, или криптокристаллические, и явно кристаллические [Заварицкий, 1955].

Г. Розенбуш предложил деление ортомагматов по глубине кристаллизации [1934], но позже стал разделять магматические породы по размерностям зерен на стекловатые, голо- и гипокристаллические, а также макро-, микро- и криптокристаллические. Он же, по-видимому, первый сформулировал правило: «Медленная кристаллизация из жидкой магмы благоприятствует образованию немногих и более крупных индивидов; быстрое охлаждение в связи с большой вязкостью и особенно сильным переохлаждением способствует выделению большого количества индивидов соответственно меньших размеров. Сообразно этому глубинные породы в среднем имеют большую величину зерна, чем эффузивные породы, и в одном и том же теле породы величина зерна увеличивается в направлении от границы этого тела с боковой породой, т. е. от поверхности охлаждения к центру массы» [1934, с. 63] (здесь и далее курсив наш. – О. И.).

Г.В. Тиррель писал: «Если охлаждение магмы длилось продолжительное время внутри метастабильной зоны кристаллизации, то образуется небольшое число центров кристаллизации, и здесь кристаллы растут до большой величины. Если охлаждение идет очень медленно, то магма может полностью выкристаллизоваться прежде, чем она достигнет лабильной зоны. Следовательно, медленное охлаждение ведет к грубозернистости. ...Если охлаждение идет достаточно скоро, то

метастабильная зона быстро минует и большая часть кристаллизации совершается в лабильной зоне. Образуется большое количество кристаллов, и в результате получается мелкозернистая порода» [1932, с. 61]. Исследователь отмечает, что скорость кристаллизации возрастает с появлением примесей других веществ, а «размер зерна зависит также, по крайней мере, от двух моментов, а именно от молекулярной концентрации присутствующего вещества и вязкости магмы. Компоненты, присутствующие в очень малых количествах, например молекулы таких минералов, как апатит, циркон, магнетит и др., имеют склонность образовывать небольшие кристаллы, потому что соответствующий материал для их роста быстро израсходуется». Г.В. Тиррель считал, что «присутствие воды, других жидкостей и газов в магматическом растворе сильно повышает его жидкое состояние, и кристаллы растут до более крупных размеров в магмах, богатых этими компонентами, чем в «сухих» магмах» [1932, с. 62]. По ученого, «мелкозернистость и присутствие стекла в изверженной породе являются, таким образом, указателями быстрого охлаждения» [1932, с. 63].

В главе «Структура и микроструктура» Г.В. Тиррель писал: «Голокристаллическая структура характерна для глубинных или плутонических изверженных пород, мерокристаллическая <т. е. частично кристаллическая> – для пород, которые затвердели на поверхности или около нее. Гологиалиновые или стекловатые типы являются менее всего распространенными... как краевые фации магматических тел, но могут находиться в виде лав (обсидиан) или в виде дайк и интрузивных залежей (пехштейн)» [1932, с. 79]. Именно Г.В. Тиррель первый сформулировал закон размерности зерен кристаллов, который мы предлагаем назвать его именем: «Степень охлаждения и вязкости магмы представляют главные факторы, регулирующие кристалличность и влияющие на это, как указано в

предыдущей главе [1932, с. 61]. *Быстрое охлаждение и сильная вязкость благоприятствуют образованию стекла, тогда как медленное охлаждение и небольшая вязкость способствуют образованию кристаллов*” [1932, с. 80].

После работ Г.В. Тирреля интерес к размерностям зерен минералов снизился. Во времена преобладания “теоретической” и “физико-химической” парадигм петрологии таким “мелочам”, как размер зерен минералов, не придавалось значения (Н. Боуэн, Т. Барт, Г. Оллинг, Ф. Тернер, Дж. Ферхуген и др.). А.Н. Заварицкий по абсолютной величине выделяет грубозернистые (больше 5 мм), среднезернистые (1–5), мелкозернистые (менее 1 мм) и афанитовые (микрораскристаллические) [1955]. При этом стекловатые породы не указываются и о причинах различия крупности зерен не сообщается.

Д.С. Штейнберг и В.И. Фельдман ограничились только следующей фразой: “Крупность зерна – функция, с одной стороны, скорости охлаждения, с другой – различий в скорости роста кристаллов” [Петрография, 1976, с. 143], существенно упростив закон Г.В. Тирреля. Понятие различия в скорости роста кристаллов не расшифровывается.

У.Т. Хуан кратко повторил выводы Г. Розенбуша и Г.В. Тирреля: “Скорость охлаждения и вязкость магмы рассматриваются как главные факторы при установлении степени кристаллизации или кристалличности... Размеры кристаллов, как и степень кристалличности породы, зависят от скорости охлаждения и вязкости магмы; большое значение имеют, кроме того, такие факторы, как молекулярная концентрация кристаллизующегося вещества в магме и состояние покоя или движения среды в процессе кристаллизации” [1965, с. 73].

Ф. Хэтч с соавторами критически высказались против “подразделения пород одного и того же состава <т. е. химического> на глубинные (или плутонические), гипабиссальные и вулканические (или эффузивные)”, считая, что “породу следует определять на основании того, что она представляет собой, а не в зависимости от ее происхождения” [1975].

Е.Б. Трейвус дал анализ теоретических представлений и экспериментальных данных о распределении зерен по размерам в магматогенных горных породах [1998]. Он изучил теории одновременного зарождения, численного баланса, неравномерных скоростей роста и нестационарной кристаллизации и пришел к общему выводу: “Рассмотрение существующих теорий возникновения распределения зерен по размерам в горных породах указывает на их неполноту и схематичность”. Отметим, что исследователем совершенно не рассматриваются условия кристаллизации и даже генетический тип процесса.

В последние годы возрождается интерес к этой проблеме. Появились работы о зависимости рас-

пределения величины крупности зерен минералов при кинетических и динамических условиях кристаллизации [Cashman, Marsh, 1988; Marsh, 1988; Cashman, 1990]. Проведен анализ влияния структуры минерала на его удлинение и размеры при разных условиях кристаллизации [Иванов, 2016]. Наши исследования условий неравновесной кристаллизации магматических пород показали, что в целом для близравновесных (плутонических) магматических пород характерны значительно большие размеры кристаллических зерен, чем в неравновесных вулканитах [Иванов, 2016, 2017]. Все это нашло отражение на шкале типов степени неравновесной кристаллизации магматитов [Иванов, 1990, 2016, 2017]. Было предложено выделять следующие типы кристаллизации по размерности зерен [Иванов, 1990, с. 108]:

- ультранеравновесный тип – стекло, кристаллов нет;
- резконеравновесный тип – зерна меньше 0.01 мм (афанитовые);
- сильно неравновесный тип – зерна от 0.1 мм до 10.0 см (вкрапленники);
- средне неравновесный тип – зерна от 1 до 10 мм;
- слабо неравновесный тип – зерна размером 1–5 мм;
- близравновесный тип – зерна величиной 5–10 мм.

Нами было детально рассмотрено влияние на размерности минералов расплавных пород скорости и времени кристаллизации, а также вязкости материнского расплава [Иванов, 2018а, б].

Было также существенно увеличено число факторов, воздействующих на размерность минералов расплавных пород. В настоящее время таковыми можно считать следующие: скорость кристаллизации или охлаждения расплава, содержание минералообразующих компонентов, структуру кристаллов, спокойную или потоковую кристаллизацию расплава, двойникование кристаллов, вязкость расплава и присутствие флюидных компонентов [Григорьев, Жабин, 1975; Иванов, 2016].

При этом доказательность влияния разных факторов различна. Если воздействие скорости кристаллизации геологически вполне очевидно, то влияние на размерность минералов магматической (расплавной) породы содержания минералообразующих компонентов требует обоснования.

Работа заключалась в сборе материала по размерностям зерен некоторых петрогенных, второстепенных и аксессуарных минералов магматических (расплавных) пород нормального (не щелочного) состава и условий кристаллизации и корреляция их с перечисленными факторами. Использовались данные по размерам зерен минералов (фотоснимки и зарисовки по фотоснимкам) магматических пород, приведенные в известных петрогра-

фических сводках, а также материалы собственных исследований. На фотоснимках измерялись размеры индивидов минералов, определялись истинные размеры в миллиметрах, для удлиненных зерен вычислялись средние размеры. Полученные размеры выносились на диаграммы “размер индивида – содержание минерала” раздельно для неравновесных вулканитов и близравновесных плутоидов.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА РАЗМЕРНОСТИ ЗЕРЕН МИНЕРАЛОВ

Г.В. Тиррель лишь бегло отметил, что размер зерен зависит “от молекулярной концентрации присутствующего вещества”. Молекулярная концентрация близка к понятию “содержание минералообразующих компонентов”, или содержание того или иного минерала в породе. Была проверена зависимость размерностей зерен минералов от их содержания в ортомагматах разного химического состава с учетом условий кристаллизации – близравновесных и неравновесных. В качестве близравновесных взяты интрузивные полнокристаллические по-

роды без видимой зональности минералов переменного состава. В качестве примера неравновесных использованы вулканиты, кристаллизовавшиеся в резко и сильно неравновесных условиях. Мы ограничимся рассмотрением ультрабазитов и базитов.

В плутоидических ультрабазитах – дунитах, гарцбургитах и плагиоклазовых гарцбургитах из расслоенных интрузий Стиллиутера, Сарановской и Скергаарда – наблюдается прямая логарифмическая зависимость размерности зерен минералов от их содержания в породе в объемных процентах (рис. 1) [Уэйджер, Браун, 1970; Иванов, 2009]. При этом размеры индивидов минералов увеличиваются от аксессуарных к второстепенным и петрогенным от долей миллиметра до 4–6 мм. При этом в разных объектах размерности минералов возрастают с повышением содержания минерала в породе.

Для резконравновесных вулканических ультрамафитов (маймечитов, пикритов) наблюдается та же общая зависимость увеличения размерностей зерен минералов с возрастанием их содержания в породе. Их особенностью является отсутствие промежуточных содержаний второстепенных минералов, больший разброс размерностей петрогенных

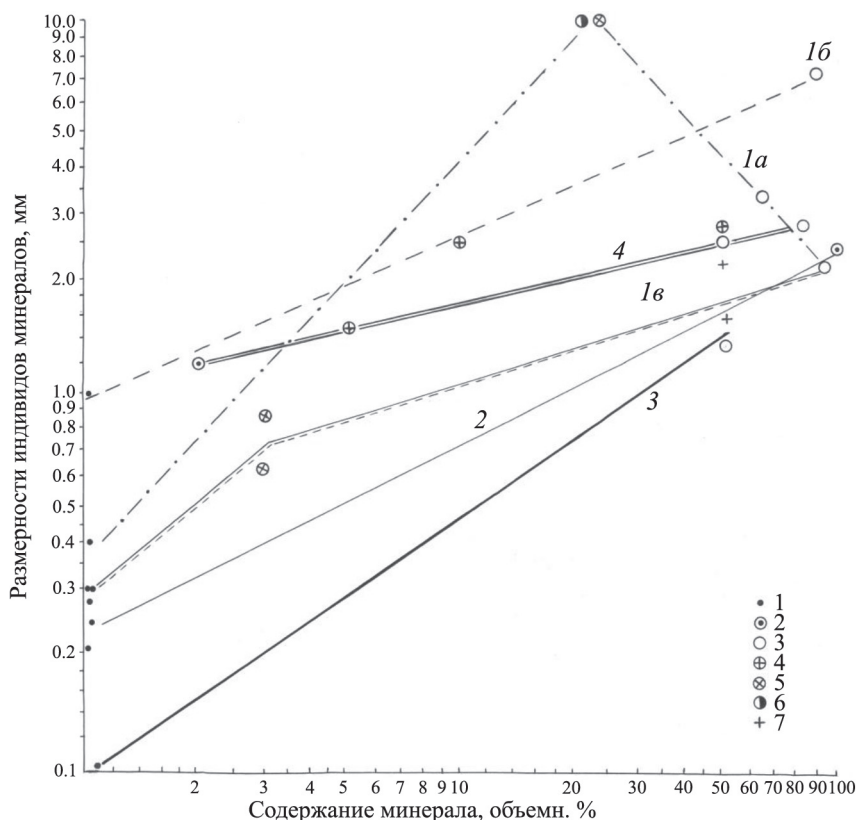


Рис. 1. Зависимость размера индивидов минералов от их содержания в породе при близравновесной кристаллизации плутоидов.

1 – хромшпинелид, 2 – магнетит, 3 – оливин, 4 – ортопироксен, 5 – клинопироксен, 6 – флогопит, 7 – плагиоклаз. Массивы: *1a* – флогопит-диопсидовый дунит, Сарановский массив; *1b* – бронзитовый дунит, Сарановский массив; *1в* – пойкилитовый гарцбургит, там же; 2 – Стиллиутер; 3 – Рам; 4 – Скергаард.

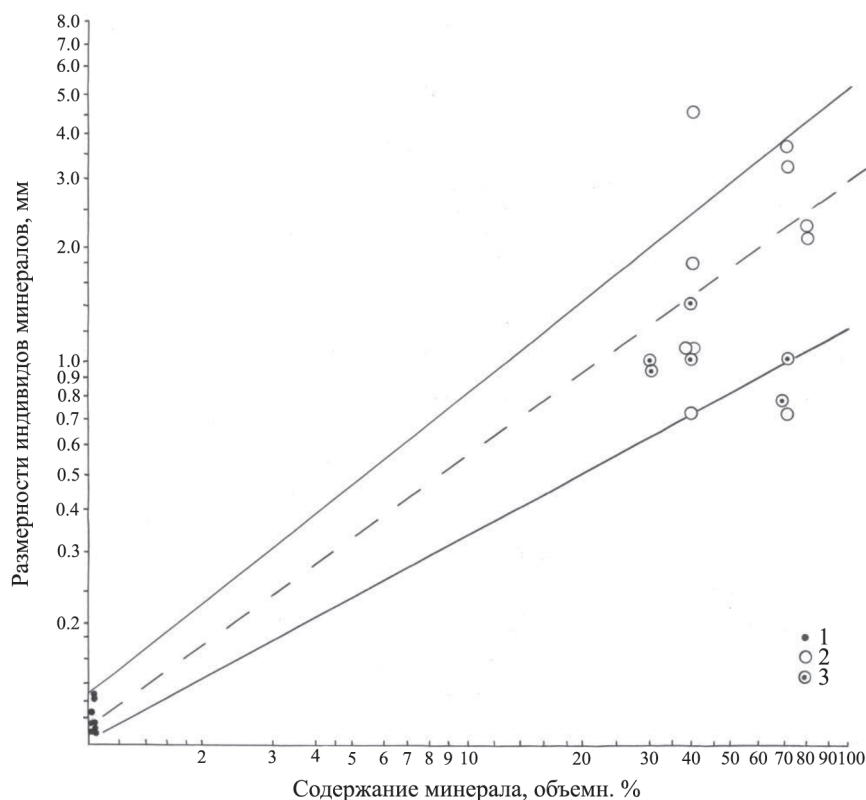


Рис. 2. Зависимость размера индивидов минералов от их содержания в породе при резко неравновесной кристаллизации вулканитов.

1 – хромит, 2 – оливин из маймечита, 3 – оливин из пикритов.

минералов и значительно меньшие размеры индивидов аксессуарных минералов [Васильев, Золотухин, 1975; Лебедева и др., 2010] (рис. 2).

Таким образом, при близравновесной и резко неравновесной кристаллизации наблюдается прямая логарифмическая зависимость между содержанием минерала и его размерами. Положение линий зависимости при близравновесной кристаллизации для разных массивов и разных пород различно.

При резко неравновесной кристаллизации размеры зерен аксессуарных минералов заметно меньше (до одного порядка) величин тех же минералов, кристаллизующихся в близравновесных условиях. При резко неравновесной кристаллизации разброс размерностей петрогенных минералов существенно выше, чем при близравновесной.

Для базитов устанавливаются те же закономерности.

ВЫВОДЫ

1. При близравновесной и резко неравновесной кристаллизации наблюдается общая закономерность – увеличение размера индивидов минералов с возрастанием их содержания в породе с некоторыми исключениями для плагиоклаза.

2. От минералов, кристаллизовавшихся в ультра- и резко неравновесных условиях к близравновесным уменьшается разброс размерностей индивидов, особенно петрогенных.

3. Размер аксессуарных и супераксессуарных минералов увеличивается от ультранеравновесных к близравновесным условиям кристаллизации на порядок.

4. Аномальное уменьшение размера индивидов минералов плагиоклаза в некоторых долеритах, диабазлах и расслоенных интрузиях может быть объяснено резким повышением вязкости расплава после кристаллизации оливина и пироксенов.

Таким образом, за исключением ультранеравновесной кристаллизации с образованием вулканического стекла, наблюдается общая связь размеров индивидов минералов расплавных пород не только со скоростью кристаллизации или охлаждения или вязкостью расплава, но и с содержанием минералообразующих компонентов.

Работа выполнена в рамках проекта УрО РАН (18-5-5-32) “Реконструкция условий формирования габбро-ультрабазитовых комплексов Урало-Монгольского пояса и связанного с ними оруденения”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев Ю.Р., Золотухин В.В.* Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск: Наука, 1975. 271 с.
- Григорьев Д.П., Жабин А.Г.* Онтогенез минералов. Индивиды. М.: Наука, 1975. 339 с.
- Заварицкий А.Н.* Изверженные горные породы. М.: АН СССР, 1955. 470 с.
- Иванов О.К.* Расслоенные хромитоносные ультрамафиты Урала. М.: Наука, 1990. 243 с.
- Иванов О.К.* Оценка степени равновесности-неравновесности при магматическом минералообразовании // Уральская минерал. школа – 2009: мат-лы всерос. науч. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 105–109.
- Иванов О.К.* Кристаллы: равновесные и неравновесные и причины изменчивости их форм // Урал. геол. журн. 2016. № 2 (110). С. 3–237.
- Иванов О.К.* Неравновесная магматическая петрология – новая парадигма петрологии // Урал. геол. журн. 2017. № 4 (118). С. 27–43.
- Иванов О.К.* Влияние скорости кристаллизации расплава на размеры индивидов минералов ортомагматов // Урал. геол. журн. 2018. № 3 (123). С. 52–69.
- Иванов О.К.* Влияние флюидных компонентов на размеры индивидов минералов расплавленных пород при массовой и направленной кристаллизации // Урал. геол. журн. 2018а. № 4 (124).
- Иванов О.К.* Систематика ортомагматических (расплавленных) пород с позиций неравновесной петрологии // Урал. геол. журн. 2018б. № 2 (122). С. 31–41.
- Лебедева С.М., Быков В.Н., Крылова М.А.* Океанические базальтовые стекла: состав, структура, спектроскопия. Миасс; Екатеринбург: Ин-т минералогии УрО РАН, 2010. 168 с.
- Петрография* / под ред. А.А. Маракушева, Т.И. Фроловой. Ч. 1. М.: МГУ, 1976. 384 с..
- Розенбуш Г.* Описательная петрография / под ред. и с доп. В.Н. Лодочкикова. Л.; М.: ОНТИ НКТП, 1934. 720 с.
- Тиррель Г.В.* Основы петрологии. Введение в науку о горных породах. М.; Л.: ГОНТИ, 1932. 328 с.
- Трейбус Е.Б.* Анализ теоретических представлений и экспериментальных данных о распределении зерен по размерам в магматогенных горных породах // ЗВМО. 1998. № 1. С. 110–117.
- Уэйджер Л., Браун Г.* Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 1970. 552 с.
- Хуан У.Т.* Петрология. М.: Мир, 1965. 575 с.
- Хэтч Ф., Уэллс А., Уэллс М.* Петрология магматических пород. М.: Мир, 1975. 511 с.
- Cashman K.V.* Textural constraints on the kinetics of crystallization of igneous rocks // *Miner. Soc. Amer. Rev. Mineralogy*. 1990. V. 24. P. 259–314.
- Cashman K.V., Marsh B.D.* Crystal size distribution (CSD) in rocks and kinetics and dynamics of crystallization. II. Makaopuhi lava lake // *Contrib. Miner. Petrol.* 1988. V. 99, no. 2. P. 292–305.
- Marsh B.D.* Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. 1. Theory // *Contrib. Miner. Petrol.* 1988. V. 99, no. 2. P. 277–291.