

В. П. ЧУПИН

**РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ АНАТЕКТИТОВ
АЛДАНСКОГО ШИТА И УСЛОВИЯ ГЕНЕРАЦИИ
ГРАНИТОИДНЫХ РАСПЛАВОВ**

(Представлено академиком В. С. Соболевым 27 V 1974)

Основные аспекты проблемы генерации и кристаллизации гранитоидных анатектитовых магм при высокотемпературном региональном метаморфизме докембрийских толщ на основе обобщения геологических и экспериментальных данных рассматриваются в ряде работ ((¹⁻³, ⁹) и др.). Чрезвычайно перспективными в решении данной проблемы представляются исследования включений в различных минералах анатектитов (⁴, ⁵). Так, например, однозначным доказательством явлений анатексиса было обнаружение и исследование раскристаллизованных включений расплава в кварце лейкосом мигматитов и собственно гранитов верхнеалданской свиты.

Породы верхнеалданской свиты метаморфизованы в условиях гранулитовой и частично амфиболитовой фаций и представлены в основном разнообразными гнейсами, кристаллическими сланцами, кварцитами, амфиболитами и различными типами изофациальных гранитоидов (⁶, ⁷).

Дальнейшие минералотермометрические исследования анатектитов различных районов Алданского щита позволили уточнить *PT*-параметры и состав флюидов в процессе анатексиса в условиях разных фаций высокотемпературного метаморфизма. Раскристаллизованные включения удалось выделить в кварце различных по составу автохтонных и параавтохтонных гранитоидов как из жильного материала послойных мигматитов, так и из небольших самостоятельных тел линзовидной, пластовой или неправильной форм (собственно граниты), а также из небольших пегматоидных обособлений. Следует отметить четкую зависимость минерального состава гранитоидов от состава вмещающих метаморфических пород.

Небольшие по размеру (до 5—10 мкм) первичные включения расплавов представлены агрегатом зерен кристаллических фаз и интерстиционной флюидной фазой (10—15% от объема всего включения). Эти обособления летучих, как показывают расчеты, вероятно, помимо газа содержат дополнительную фазу в виде каемки водного раствора или сжиженных газов (преимущественно углекислоты). Твердые фазы раскристаллизованных включений по оптическим свойствам наиболее близки к полевым шпатам (калишпату и (или) кислому плагиоклазу) и кварцу. Таким образом, исследуемые включения расплавов являются природными микромоделями реальных гранитных систем с летучими. Поэтому температуры и особенности основных фазовых превращений в них в процессе нагревания позволяют составить более точные представления об особенностях генерации и кристаллизации анатектитовых расплавов. При нагревании до температур 680—700° никаких видимых изменений во включениях не происходит. В интервале 700—720° заметно начало плавления твердых фаз, и при 760—820° (в зависимости от конечной температуры гомогенизации) отмечается более интенсивное плавление кристаллических фаз и обособление небольших газовых пузырьков.

На раскристаллизованные включения гранитоидных расплавов по внешним признакам очень похожи вторичные расплавно-солевые и водно-соле-

вые включения, а также комбинации мелких отдельных кристалликов полевых шпатов с «прилепленными» к ним вторичными газово-жидкими включениями. Надежная диагностика этих типов включений возможна лишь по температурам основных фазовых превращений при нагревании. Так, для «солевых» включений характерны существенно более низкие температуры начала растворения твердых фаз ($100-150^\circ$), а для аномальных включений из последнего примера, наоборот, температуры заметного контактного плавления и полного расплавления кристалликов очень высоки: $850-900^\circ$ и выше 1000° соответственно. Кроме того, небольшие размеры включений расплава чрезвычайно затрудняют их диагностику и исследование.

Для получения достоверных значений температур гомогенизации включений расплава необходимо замеры проводить для стабилизированных равновесных условий. В нашем случае достаточны 10—20-часовые выдержки вблизи этой температуры. Специально был проведен длительный опыт (20 дней) при температуре на $20-30^\circ$ ниже предварительно установленной температуры гомогенизации. Оказалось, что включения после такой длительной выдержки не гомогенизировались, и температура гомогенизации их близка к предварительно установленной.

Следует отметить, что истинные температуры кристаллизации гранитоидов в рассматриваемом случае соответствуют температурам гомогенизации включений расплава. Основанием для такого вывода являются полученные автором совместно с И. Т. Бакуменко результаты анализа температурных поправок на сжимаемость кварца и гранитного расплава, которые показали, что обе поправки имеют близкие значения и противоположны по знаку, т. е. взаимно компенсируются.

Результаты термометрических исследований расплавных включений, приведенные в табл. 4, позволили установить, что различные типы автохтонных и параавтохтонных гранитоидов гранулитовой фации верхнеалданской свиты имеют близкие температуры гомогенизации включений и кристаллизовались из расплава в интервале температур $850-900^\circ$. Для анатектитов амфиболитовой фации этой же свиты характерен интервал температур кристаллизации $790-830^\circ$. По этим данным можно сделать вывод о несколько более низкой температуре генерации и кристаллизации анатектических выплавов в условиях наложенной амфиболитовой фации по сравнению с гранулитовой для верхнеалданской свиты. Для анатектитов амфиболитовой фации западной части Алданского щита (бассейн р. Олекмы) установлены еще более низкие температуры: $760-790^\circ$. Полученные результаты подтверждают известное предположение о различии в температурах анатексиса при региональном метаморфизме для разных фаций (⁸) и др.). Следует отметить, что наши значения температур на 50° и более превышают температуры, приводимые в ряде работ (^{2, 8, 10}). Не останавливаясь на причинах этих расхождений, необходимо подчеркнуть, что в настоящее время теоретически обоснованы (^{11, 12}) и др.) и экспериментально доказаны (¹³) надежность и высокая точность определения температур кристаллизации минералов по температурам гомогенизации расплавных включений в них.

Особо важное петрологическое значение имеет решение вопроса о составе и количестве летучих, участвующих в процессе анатексиса метаморфических пород. По температурам гомогенизации включений расплава с использованием экспериментальных данных по плавлению гранитных систем с водой (¹⁴) можно установить, что давление воды при раскристаллизации анатектитовых выплавов на регрессивной стадии гранулитовой фации при температурах $850-900^\circ$ не превышало $0,3-0,8$ кбар (около 2 вес. % воды), т. е. эти гранитные расплавы резко обеднены водой по сравнению с водонасыщенными. Расчеты по включениям расплава в кварце анатектитовых гранитоидов гранулитовой фации показали, что кристаллизовались эти граниты в условиях дефицита воды ($1,2-1,9$ вес. %), но при существенной роли других летучих (методика будет изложена автором совместно

Температуры гомогенизации раскристаллизованных включений
расплава в кварце анатектитов Алданского щита

№№ п.п.	Местонахождение	Порода	$T_{\text{гом}}$, °C
Гранулитовая фация			
1	Пизовья р. Чампулы, приток р. Алдана	Мигматиты	850—890
2	То же	Граниты	860—900
3	р. Алдан, междуречье Нимгеркана и Чампулы	»	870—890
4	То же	»	840—880
Амфиболитовая фация			
5	р. Алдан, район пос. Суон-Тийт	Мигматиты	800—830
6	То же	»	800—820
7	» »	»	790—840
8	Низовья р. Унгры	»	800±40
9	р. Олекма, устье р. Тас-Хайло	»	760—790
10	р. Алдан, район пос. Суон-Тийт	Граниты	850—870
11	То же	»	810±20
12	р. Алдан, устье Большого Нимыра	»	800±20

Примечание. № 1 (обр. №№ 725, 717) — лейкократовый, двуполевошпатовый (Пл > КШШ) гранит из послонных прожилков мигматитов по кварцитам; № 2 (№ 721) — слабоперемешанные биотитовые граниты среди кварцитов и гнейсов; № 3 (№№ 726, 727, 729, 635, 636) — лейкократовые граниты среди кварцитов; № 4 (№№ 586, 587) — интрузивно-анатектические аляскитовые граниты из зоны контакта кварцитов и гнейсов; № 5 (№ 915) — лейкосомы послонных мигматитов в зоне контакта гнейсов и кварцито-гнейсов; № 6 (№ 5—935-а, б) — биотитовые, двуполевошпатовые (Пл > КШШ) граниты из мелких послонных прожилков и линз в гранито-гнейсах; № 7 (№№ 763-А, 759, 749) — графический пегматит из прожилков и линз в мигматитах по кристаллосланцам и гнейсам; № 8 (№ 4—802) — лейкосомы послонных мигматитов в основных кристаллосланцах; № 9 (№ В-379—1) — биотит-амфиболовый диатектит (по Менерту) (из коллекции В. С. Шкодзинского и В. И. Кицула); № 10 (№ 4—856) — интрузивно-анатектический плагиигранит из зоны контакта кварцитов с кристаллосланцами; № 11 (№ 5—1004) — перемешанные или слабоперемешанные аляскитовые граниты в кварцитах; № 12 (№ 4—872) — аляскитовые граниты из зоны контакта гранито-гнейсов и кристаллосланцев.

с И. Т. Бакуменко в специальной работе). В состав летучих, как показали результаты определения состава газовой фазы включений расплава, входят примерно в равных количествах углекислота (до 60 об.%) и группа нерасчлененных газов (NH_3 , H_2S , SO_2 , HCl , HF) (анализы выполнены Н. А. Шугуровой). По предварительным расчетам, в анатектитовых вышлавках гранулитовой фации было растворено 0,4—0,6 вес.% «сухих» газов. По этим данным, отношение H_2O : «сухие» газы (в основном CO_2) в расплаве примерно равно 4 : 1. Принимая предположение о равновесии свободного метаморфического флюида с расплавом при анатексисе (^{1, 2, 8}), по диаграмме изменения свободного и растворенного флюида при плавлении «гранитной эвтектики» в равновесии со смесью H_2O и CO_2 ($P_{\text{фл}}=5$ кбар) (¹) можно установить, что отношение H_2O : CO_2 во флюиде достигает значений 1 : 5 или 1 : 6. Таким образом, подтверждается теоретический вывод о низкой доле воды в составе метаморфического флюида в условиях гранулитовой фации (т. е. низкой доле $P_{\text{H}_2\text{O}}$ в $P_{\text{фл}}$) ((^{1, 2, 8}) и др.).

Следует подчеркнуть важность открытия Ю. А. Долговым и др. еще в 1967 г. метаморфогенных включений уплотненной жидкой углекислоты в метаморфических минералах (¹⁵). Этим однозначно было доказано присутствие значительных количеств свободной углекислоты (и высокое P_{CO_2}) во флюиде при метаморфизме даже бескарбонатных пород, что соответствует идеям Д. С. Коржинского. Позднее этот факт подтвержден работами зарубежных петрологов ((¹⁶) и др.), а также нашими исследованиями подобных включений в минералах метаморфитов и анатектитов верхнеалданской свиты (⁵). Для них установлены давления флюида в момент формирования порядка 6 кбар. Кроме того, как показано в (¹⁷), во флюиде наряду с преобладанием углекислоты отмечается азот+редкие газы. Как установлено в

(¹⁸) и подтверждено исследованиями включений расплава, эти летучие относятся к типу плохо растворимых в расплаве газов, и выше было показано их высокое парциальное давление во флюиде. Учитывая предположение В. С. Соболева с сотрудниками (¹, ⁴, ⁸), о резком повышении температуры солидуса гранитных систем при уменьшении отношения $P_{H_2O} : P_{фл(CO_2)}$, автор именно этим фактором склонен объяснять высокие температуры генерации и кристаллизации природных анатектических выплавов (особенно для гранулитовой фации), установленные по включениям.

Общий возможный ход анатексиса для гранулитовой фации по результатам исследования включений и теоретическим построениям (¹, ⁴) представляется следующим. Первые порции расплава, обогащенные летучими, должны были появиться при довольно низкой температуре — порядка 700°. С повышением температуры до 850—900° количество расплава непрерывно увеличивалось. В связи с этим в условиях закрытой системы (без притока летучих) происходило резкое уменьшение доли воды в метаморфизирующем флюиде (до значений меньше 0,2), а также в равновесных с ним гранитных выплавках. На регрессивной стадии метаморфизма эти расплавы кристаллизовались при температурах 850—900°, и в случаях их насыщения углекислотой (т. е. при достижении равновесия между флюидом и расплавом при анатексисе), как следует из (¹⁸), должно было происходить непрерывное отделение жидкой углекислоты от расплава. Возможно, реликты этих «сухих» газов и фиксируются одиночными включениями плотной сжиженной CO₂ с примесью других газов в кварце изучавшихся анатектитов.

Следует надеяться, что дальнейшие исследования помогут внести ясность как в этот вопрос, так и в генетическую природу таких гранитоидных образований, как чарнокиты и высокоглиноземистые граниты.

Институт геологии и геофизики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
17 V 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. С. Соболев, И. Т. Бакуменко и др., Геол. и геофиз., № 4 (1971). ² Г. Винклер, Генезис метаморфических пород, М., 1969. ³ К. Менерт, Мигматиты и происхождение гранитов, М., 1971. ⁴ В. С. Соболев, Строение верхней мантии и способы образования магм, «Наука», 1973. ⁵ А. А. Томиленко, В. П. Чупин, В кн.: Обзорные карты и общие проблемы метаморфизма, т. 2, Тр. Всесоюз. симпозиума, Новосибирск, 1972. ⁶ Г. М. Другова, Л. В. Климов и др., Тр. Лаб. геол. докембрия АН СССР, в. 8 (1959). ⁷ Е. М. Лазько, Геологическое строение западной части Алданского кристаллического массива, Львов, 1956. ⁸ В. С. Соболев, Н. Л. Добрецов и др., В кн.: Проблемы кристаллохимии и эндогенного минералообразования, «Наука», 1967. ⁹ Н. Г. Судовиков, Региональный метаморфизм и некоторые проблемы петрологии, Л., 1964. ¹⁰ М. Д. Крылова, С. Н. Васильева, В кн.: Ультраморфизм и метасоматоз докембрийских формаций СССР, «Наука», 1966. ¹¹ Н. П. Ермаков, Геохимические системы включений в минералах, 1972. ¹² И. Т. Бакуменко, В кн. Проблемы петрологии и генетической минералогии, т. 2, «Наука», 1970. ¹³ И. Т. Бакуменко и др., ДАН, т. 163, № 5 (1967). ¹⁴ А. А. Кадик и др., Вода в магматических расплавах, «Наука», 1971. ¹⁵ Ю. А. Долгов и др., ДАН, т. 175, № 2 (1967). ¹⁶ J. Touret, Lithos, v. 4 (1971). ¹⁷ А. А. Томиленко, В сб.: Тез. докл. IV Региональн. совещ. по термобарогеохимии процессов минералообразования, Ростов-на-Дону, 1973. ¹⁸ А. А. Кадик, Автореф. докт. дисс., М., 1973.