



РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ КВАРЦЕВЫХ ДОЛЕРИТОВ ШТОКА г. КРЕМЕННАЯ (ГОРНЫЙ КРЫМ)

В.А. УТЕНКОВ*, А.В. ТУРОВ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Шток кварцевых долеритов шириной 60 м в горизонтальном сечении, вскрытый карьером, сильно изменен вторичными процессами, что затрудняет его изучение.

Цель. Восстановление первичных магматических структур, определение условий кристаллизации и поздних изменений.

Материалы и методы. Авторами отобраны образцы, изучены шлифы и химические анализы пород для оценки условий магматической кристаллизации и массовых поздних изменений.

Результаты. Установлено, что шток имеет первичное двойное строение — широкий центр и узкую кольцевую кайму (1 м). Это объясняется контракцией и повторным внедрением расплава вдоль края штока. Расплав внутри кольца адиабатически разогревается до 1175 °С, а давление воды падает до 0,5 кбар по сравнению с центром (900 °С и 2 кбар). Поэтому центр и край имеют разный первичный состав: в центре — плагиоклаз (An50), кварц, биотит, магнетит, стекло (5%), на краю — ранний плагиоклаз, кварц, пироксен, поздние микролиты плагиоклаза, миоароловые пустоты, стекло (30—40%). Окончательное затвердевание и новая контракция приводят к образованию радиальных трещин в кольце. Механическая работа, затраченная на их образование, резко снижает уровень внутренней энергии, а расширение трещин приводит к адиабатическому охлаждению раствора в краевой зоне штока и массовому низкотемпературному метасоматозу (260—132 °С). Реакции идут диффузионно при застойном состоянии раствора с массовым образованием псевдоморфоз. Из-за уменьшения объема твердых фаз в реакциях и нарастания общей пористости в условиях доминирующей декомпрессии часть кремнезема удаляется вверх. Центр охлаждается медленно с сохранением реликтов и последовательной сменой от кислотных к щелочным. Начальные кислотные реакции обеспечиваются полной диссоциацией слабой угольной кислоты, затем сильные кислотные реакции — хлором, а в конце щелочные реакции — неполной диссоциацией угольной кислоты.

Ключевые слова: юго-западная часть Горного Крыма, шток кварцевых долеритов, кольцевая контракция, радиальные трещины контракции, адиабатический разогрев расплава, адиабатическое охлаждение растворов, вулканическое стекло, миоароловые пустоты, диффузионные реакции, псевдоморфозы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Утенков В.А., Туров А.В. Реконструкция условий магматической кристаллизации и процессов изменения кварцевых долеритов штока г. Кременная (Горный Крым). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2022;64(4):22—39.
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-4-22-39>

Статья поступила в редакцию 11.07.2022

Принята к публикации 28.09.2022

Опубликована 14.11.2022

* Автор, ответственный за переписку

RECONSTRUCTING THE MAGMATIC CRYSTALLIZATION CONDITIONS AND ALTERATION PROCESSES OF QUARTZ DOLERITES OF THE KREMENNAYA MOUNTAIN STOCK (MOUNTAIN CRIMEA)

VLADIMIR A. UTENKOV*, ALEKSANDR V. TUROV

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Introduction. The 60 m wide quartz dolerite stock, opened by a quarry, is heavily alternated by secondary processes, which makes it difficult to study.

Aim. Reconstruction of primary magmatic structures and determination of conditions conducive to their crystallization and late alterations.

Materials and methods. In order to assess the conditions of magmatic crystallization and massive late alterations, thin sections of selected samples were studied and chemical analysis of rocks was performed.

Results. The stock was established to have a primary double structure with a wide centre and a narrow annular border (1 m). This is due to the contraction and reintroduction of a melt along the edge of the stock. The melt inside the ring is adiabatically heated to 1175° and the water pressure drops to 0.5 kbar, as compared to the centre (900° and 2 kbar). Therefore, the centre and edge have a different primary composition with plagioclase (An_{50}), quartz, magnetite and glass (5%) in the centre and early plagioclase, quartz, pyroxene, plagioclase microlites, miarolitic cavities and glass (30–40%) at the border. Final hardening and new contraction lead to the formation of radial cracks in the ring. The mechanical work, spent on their formation, sharply reduces the level of internal energy, while the expansion of cracks leads both to adiabatic cooling of the solution in the border zone of the stock and massive low-temperature metasomatism (260–132°C). The reactions proceed diffusively when the solution is stagnant with the massive formation of pseudomorphoses. Due to a decrease in the volume of reacting solid phases and an increase in the total porosity under the conditions of dominant decompression, part of the silica is removed upwards. The centre is cooled slowly with the preservation of relics and their successive alteration from acid to alkaline ones. Initial acid reactions are provided by the complete dissociation of a weak carbonic acid, followed by strong acid and final alkaline reactions provided by chlorine and incomplete dissociation of carbonic acid, respectively.

Keywords: southwestern part of the Mountain Crimea, quartz dolerite stock, ring contraction, radial contraction cracks, adiabatic melt heating, adiabatic solution cooling, volcanic glass, miarolitic cavities, diffusion reactions, pseudomorphoses

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: the study had no sponsorship.

For citation: Utenkov V.A., Turov A.V. Reconstructing the magmatic crystallization conditions and alteration processes of quartz dolerites of the Kremennaya mountain stock (Mountain Crimea). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(4):22–39. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-4-22-39>

Manuscript received 11 July 2022

Accepted 28 September 2022

Published 14 November 2022

* Corresponding author

Строение и состав штока в горизонтальном сечении

В юго-западной части Горного Крыма в долине р. Бодрак на территории учебного геологического полигона МГРИ, МГУ, СПбГУ распространены среднеюрские (байосские) субвулканические, вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования. Тела интрузивных и субвулканических пород, представленные небольшими дайками, штоками, силлами среднего и основного состава, прорывают отложения таврической серии (верхний триас — нижняя юра) и вулканы байосса [8]. К этому комплексу относится рассматриваемый в статье небольшой шток кварцевых долеритов¹, расположенный в левом борту средней части оврага Шара (г. Кременная). Шток вскрыт старым карьером и представляет его горизонтальное полотно. Шток окружают слабо измененные алевритистые аргиллиты юры. Породы самого штока, напротив, подвержены сильным низкотемпературным изменениям. По положению в разрезе глубина эрозионного среза штока в данном месте не превышает 1 км.

При диаметре штока ~60 м в его горизонтальном сечении четко различаются широкая центральная зона с темно-серой окраской и узкая краевая зона (≤ 1 м) с более светлой желтовато-серой окраской. Мелкозернистые кварцевые долериты, несмотря на сильный автометасоматоз и обилие псевдоморфоз, сохраняют магматические структуры, которые в центре и на краю оказываются разными. Минеральный состав продуктов кристаллизации в этих зонах тоже разный, причем край штока отличается высокой долей стекла.

Проблемой является факт чрезвычайно сильного низкотемпературного изменения пород штока. В отличие от него другие магматические тела данного района (дайки, силлы и др.) содержат преимущественно неизмененные первичные минералы [17]. Это связано с тем, что в этих телах летучие компоненты либо удаляются вверх, либо скапливаются локально у пологой кровли. В штоке большая их часть локализуется в межзерновых растворах и в трещинах контракции, которые возникают в момент затвердевания расплава. Причем контракция в штоке проявляется дважды. Сначала, еще на магматической стадии, она служит фактором кольцевого отслоения и поступления дополнительного расплава с его адиабатическим разогревом

из-за усиливающейся дегазации. А вот окончательное затвердевание ведет к резкому снижению температуры растворов. По-видимому, это связано с высокой скоростью их охлаждения в новых расширяющихся трещинах контракции при отсутствии передачи тепла от горячих стенок (адиабатическое охлаждение растворов). Трещины заполняются низкотемпературными минералами, а в промежутках между трещинами возникают обильные псевдоморфозы.

Доля измененных минералов на краю штока составляет 90%, а в центре — 50—60%. Вторичные минералы в составе псевдоморфоз: кислый плагиоклаз, кварц, гидрослюда, карбонаты, каолинит, хлорит, гематит и гидрооксиды железа. Благодаря хорошей сохранности первичных структур был установлен начальный минеральный состав пород, что необходимо для оценки условий кристаллизации. Учтены также возникающие при метасоматозе пустоты, заполненные поздними кварцем, карбонатами и гематитом.

Воспроизведенный первичный состав пород в центре штока (%): кварц — 10, таблитчатый плагиоклаз — 50—60, биотит — 10, магнетит — 5, апатит — сл., стекло — 5. То же на краю штока: кварц — 10, микролиты плагиоклаза — 30—40, пироксен — 10, стекло — 30—40, миароловые пустоты — ≤ 10 .

Главное отличие восстановленного состава пород в этих зонах состоит в том, что в краевой зоне штока резко повышено содержание стекла по сравнению с центром. Кроме того, судя по псевдоморфозам, на краю штока присутствовал пироксен, а в центре — биотит (в паре с неизмененным магнетитом).

В таблице приводятся составы кварцевых долеритов в центре штока (1а), на краю (1б), а также состав наружных алевритистых аргиллитов на контакте со штоком (1в) и на небольшом удалении от штока (1г). Низкая сумма в анализах пород штока (1а и 1б) обусловлена присутствием большого количества поздних карбонатов (содержание CO_2 не определялось). Обращает внимание более низкое содержание MgO на краю штока при одинаковой высокой доле Fe_2O_3 на краю и в центре. Содержание в породах фтора, хлора ($<0,02\%$) и серы ($<0,01\%$) на пределе чувствительности метода.

Низкое содержание SiO_2 (47% в пробах 1а и 1б против нормы 60% для кварцевых долеритов) связано с выносом кремнезема при массовом развитии каолинита по стеклу и плагиоклазу и при поздней карбонатизации. Боковые алевритистые аргиллиты (1в и 1г) изменены слабо

¹ Название «кварцевый долерит» допускается как частная разновидность долеритов [7] и принято ввиду использования опорного кварц-плагиоклазового равновесия.

Таблица. Химический состав (мас. %) кварцевых долеритов в центре (1а), на краю штока (1б) и алевритистых аргиллитов у контакта (1в) и в 0,5 м (1г) от границы штока. Данные рентгеноспектрального анализа (ВИМС)
Table. Chemical composition (wt. %) of quartz dolerites in the center (1a), at the edge of the stem (1b) and silty mudstones at the contact (1v) and 0.5 m (1g) from the stem boundary. X-ray spectral analysis (VIMS) data

№№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S
1а	46,8	0,7	17,4	9,8	0,15	3,8	8,6	3,0	0,27	0,08	90,6
1б	47,4	0,7	21,7	9,3	0,2	0,7	10,0	2,74	0,3	0,08	93,84
1в	65,8	0,8	21,5	4,7	0,04	1,0	1,4	0,91	3,2	0,06	99,41
1г	64,2	0,8	20,5	5,2	0,06	0,7	1,6	0,94	3,11	0,07	97,18

и имеют такой же состав как у контакта со штоком, так и на удалении от него.

Восстановленный по псевдоморфозам первичный минеральный состав пород на краю штока сильно отличается от центра. Выяснение причины этого различия представляет первую задачу данной работы. Второй задачей является установление природы массовых вторичных изменений.

Условия магматической кристаллизации в центре и на краю штока

Обозначенная горизонтальная зональность штока (широкий центр и узкий край) отражается не только в присутствии разных первичных цветных минералов, но и в разной доле стекла. Напомним, что эти первичные фазы устанавливаются по псевдоморфозам. В широком центре штока кварцевые долериты отличаются однородностью, изначальным присутствием биотита и магнетита, а также малым количеством стекла без его активного взаимодействия с минералами. В узкой краевой зоне штока, где вместо биотита и магнетита присутствовал пироксен, резко возрастает доля измененного стекла, образующегося при плавлении плагиоклаза. Это означает, что краевое кольцо представляет результат повторного внедрения расплава, который разогревался и при затвердевании содержал повышенную долю стекла. Очевидно, что краевая (кольцевая) щель возникает из-за контракции в момент начального затвердевания расплава, формирующего широкий центр штока. Это объясняет минеральный и температурный контраст между центром и узким краем. Представление о затвердевании магматической колонны вулкана от краев к центру без учета контракции дано в работе [4] и здесь не рассматривается.

Важно, что, несмотря на минеральные различия начальных продуктов кристаллизации, в широком центре и узкой краевой зоне есть два общих и равновесных магматических минерала — кварц и плагиоклаз. Они весьма информативны в отношении

условий кристаллизации. Наличие кварца отражает верхний уровень среза магматической колонны и является следствием вертикальной дифференциации расплава [4]. Плагиоклаз в центре штока выделяется один раз, достигая равновесия с присоединяющимся кварцем. Плагиоклаз в краевой зоне штока образуется дважды. Здесь он сначала появляется вместе с кварцем, а затем — уже без кварца — в форме микролитов внутри стекла. Судя по разному количеству стекла и разным цветным минералам, условия перемещения и затвердевания расплава в центре и на краю штока существенно отличались. Ниже приведены характерные формы минералов, а также последовательность и условия кристаллизации в центре и на краю штока.

В широком центре штока нет никаких признаков концентрической зональности. Несмотря на большое количество вторичных минералов, повсюду различимы участки, где их все же не очень много. Здесь кроме кварца сохраняются первичный плагиоклаз и магнетит, и лишь биотит замещен хлоритом. Плагиоклаз — главный минерал породы. Он образует вытянутые таблицы (до 0,5 мм), которые выделяются из расплава после биотита и магнетита, причем большей частью без кварца. Лишь в конце кристаллизации к плагиоклазу присоединяется кварц в виде равномерно рассеянных мелких ксеноморфных зерен (рис. 1а). Внутри кварца, всегда рядом с его внешней границей, содержатся таблички плагиоклаза с характерной узкой лейстовидной формой (рис. 1б). Здесь же видно, что по кварцу и плагиоклазу развивается поздний кальцит. В породе иногда встречается и более крупный кварц. Но он является продуктом постмагматического разрастания раннего магматического кварца (см. следующий раздел).

Плагиоклаз, образовавшийся как до появления кварца, так и вместе с ним, имеет устойчивый состав андезин-лабрадора (An_{50}^{2}). Если

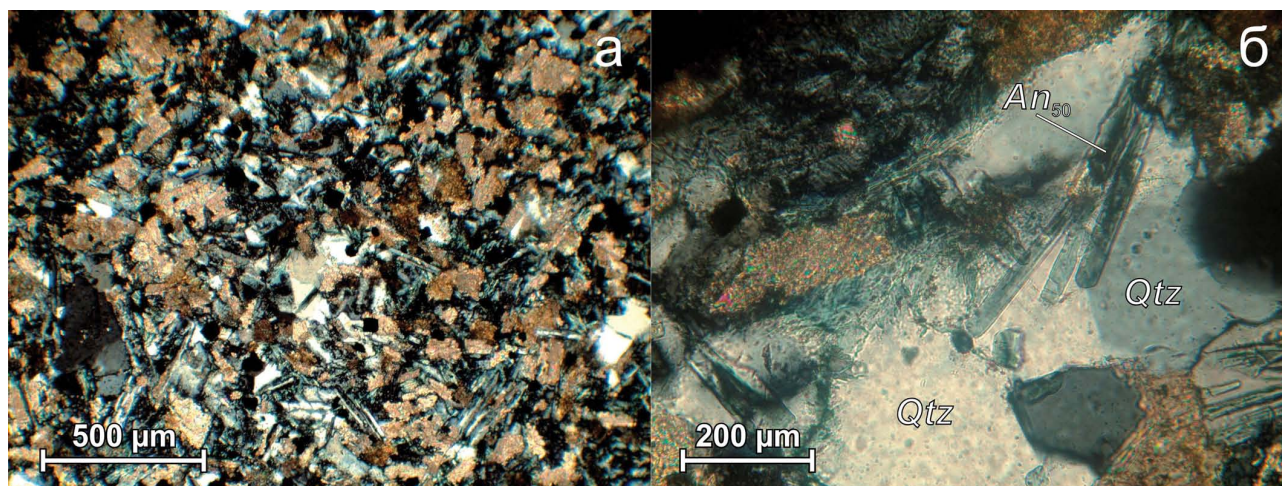


Рис. 1. Структура кварцевого долерита в центре штока: а) мелкий лейстовидный плагиоклаз, редкие ксеноморфные зерна кварца и поздний кальцит (с анализатором, об. 9×); б) кварц с включениями плагиоклаза (с анализатором, об. 20×)

Fig. 1. The structure of quartz dolerite in the center of the stem: а) fine leystoid plagioclase, rare xenomorphic quartz grains and late calcite (with analyzer, vol. 9×); б) quartz with plagioclase inclusions (with analyzer, vol. 20×)

принять давление водного флюида $P_{H_2O} = 2$ кбар, то равновесию $Qtz + An_{50} + L$ будет соответствовать температура 900—950 °С [22]. При таком высоком давлении воды присутствие CO_2 не влияет на температуру солидуса [15]. Конечная (малая) часть расплава затвердевает в условиях пассивной декомпрессии, превращаясь в стекло без повторного плавления кварца и плагиоклаза.

На краю штока, в его контрастной кольцевой зоне шириной всего 0,5—1 м, картина кристаллизации гораздо более сложная. Ее восстановление затруднено еще и тем, что здесь все минералы, кроме кварца с мелкими включениями плагиоклаза, превращены в псевдоморфозы (рис. 2). Тем не менее первичные формы минералов различимы. Среди отличий краевой зоны следует выделить большое количество измененных микролитов и стекла, а также присутствие псевдоморфоз по пироксену (а не по биотиту).

Пироксен, преобразованный в псевдоморфозы гематита и сидерита (с примесью каолинита), имеет вид темных призм (рис. 2а, б). Рядом находятся зональные трещины и гнезда, заполненные по краям гематитом, а в центре — сидеритом. Сохранившийся кварц образует ксеноморфные зерна. В отличие от центра штока здесь рядом с кварцем нет наружного плагиоклаза, а сам кварц как бы корродирован стеклом. Вместо плагиоклаза к кварцу приближен пироксен (точнее, псевдоморфозы по пироксену) (рис. 2в). Но при большом увеличении видно, что внутри кварца, около самого его края, есть очень мелкие идиоморфные

включения раннего плагиоклаза, не затронутого поздними изменениями (рис. 2г). Очевидно, что плагиоклаз изначально все же присутствовал и за пределами зерен кварца, а также примыкал к кварцу. Но он был расплавлен, из-за чего границы кварца приобрели неровную, изъеденную форму. Сокращение расстояния между кварцем и пироксеном отражает удаление части расплава без кристаллов [21]. Избирательное плавление раннего плагиоклаза сменяется образованием стекла и микролитов нового плагиоклаза без кварца. Структурное соотношение микролитов и стекла сохраняется, несмотря на их полное вторичное замещение, и хорошо различается без анализатора (рис. 2д). С анализатором (рис. 2е) видны светлые пластинки гидрослюды, замещающие края микролитов, тогда как их центр замещен каолинитом с поздним наложением красных гидрооксидов Fe.

Обилие стекла и микролитов, а также растворение начального плагиоклаза показывают, что условия и порядок кристаллизации на краю штока существенно отличались от центра. В частности, плавление раннего плагиоклаза указывает на разогрев из-за декомпрессии и дегазации [4, 6]. Верхний уровень разогрева ограничен температурой устойчивости пироксена в паре с плагиоклазом (1175 °С), если принять снижение P_{H_2O} до 0,5 кбар [23]. Частичное плавление пироксена (коррозия стеклом) означает, что этот рубеж иногда преодолевается. В целом температура на краю штока на ~200 °С выше, чем в центре, а давление на ~1,5 кбар ниже.

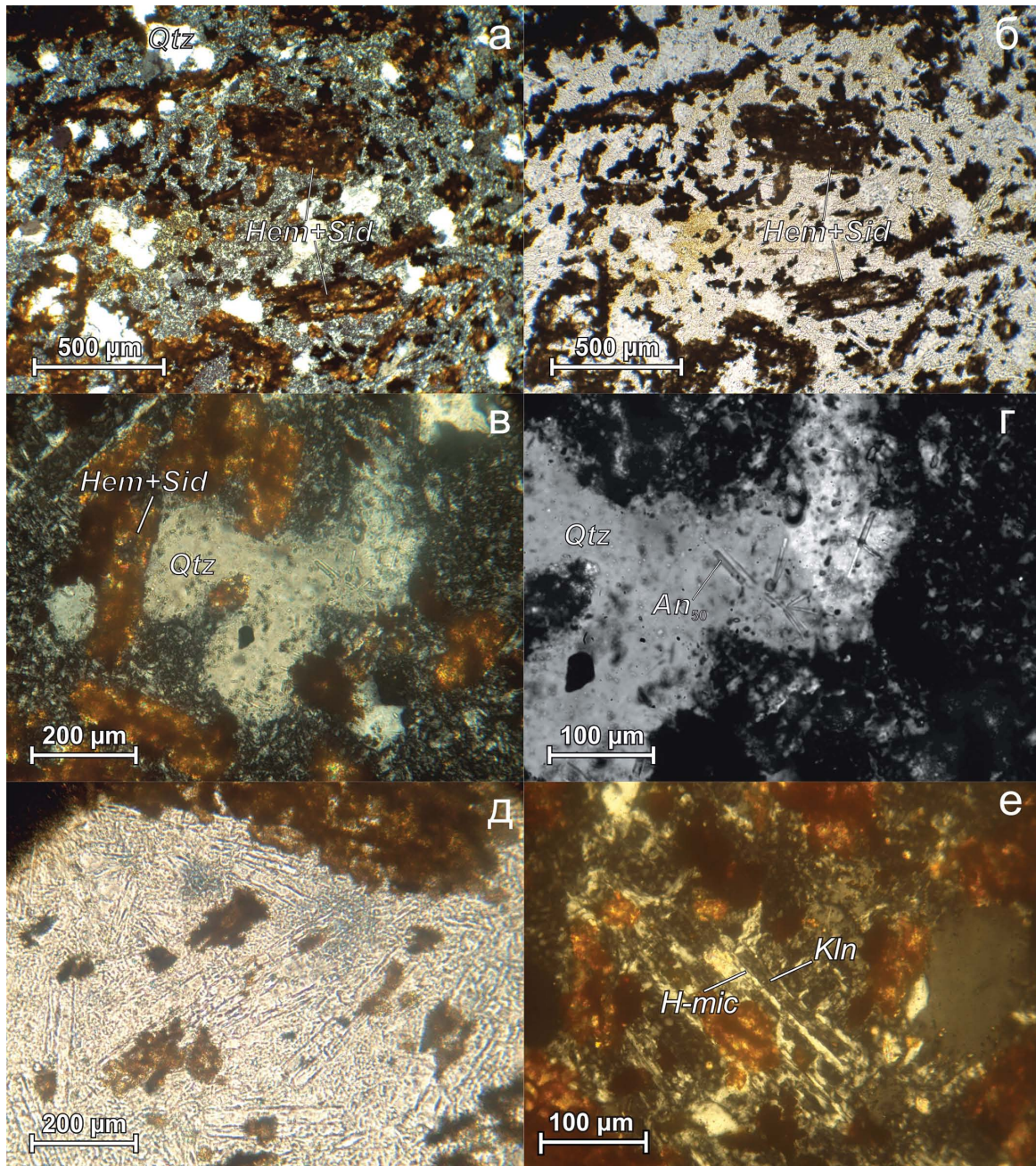


Рис. 2. Кварцевый долерит краевой зоны штока, сохраняющий магматическую структуру на фоне массовых поздних изменений: а) общая структура породы с кварцем и измененным пироксеном (с анализатором); б) то же без анализатора; в) кварц, «корродированный» стеклом; г) тот же кварц при большом увеличении с видимыми включениями мелких таблиц плагиоклаза (в, г — с анализатором); д) микролиты и стекло, превращенные в каолинит, и ожелезненные остатки пироксена (без анализатора); е) микролиты плагиоклаза, в центре замещенные каолинитом (темное), а по краям — гидрослюдой (светлое), с поздним наложением гидрооксидов Fe (с анализатором)

Fig. 2. Quartz dolerite of the marginal zone of the stock, preserving the magmatic structure against the background of massive late changes: а) the general structure of the rock with quartz and modified pyroxene (with an analyzer); б) the same without an analyzer; в) quartz «corroded» by glass; г) the same quartz at high magnification with visible inclusions of small plagioclase tables (в, г — with an analyzer); д) microliths and glass converted into kaolinite, and hardened pyroxene residues (without an analyzer); е) plagioclase microliths, replaced in the center by kaolinite (dark), and at the edges — hydroslud (light), with late application of Fe hydroxides (with analyzer)

Сопоставление условий кристаллизации в центре и на краю штока

Сравнивая центр и край штока, можно видеть, что в обоих случаях до начала декомпрессии и появления стекла из расплава последовательно выделяются магнетит (в центре штока), цветные минералы и плагиоклаз. Это соответствует снижению температуры и давления [6]. Затем к плагиоклазу присоединяется кварц. Между ними и расплавом возникает устойчивое равновесие $Qtz + An_{50} + L$. Это равновесие, судя по постоянству состава плагиоклаза, представляет невариантное состояние — эвтектику при фиксированных значениях T и P_{H_2O} , что полностью исключает передачу тепла в боковые породы по механизму теплопроводности [4].

Дальнейшая дегазация приводит к разогреву остаточного расплава, но с разной интенсивностью в центре и на краю штока. В центре разогреву подвергается весьма малая конечная доля расплава, который пассивно затвердевает в виде стекла. На краю штока возникает узкая кольцевая щель контракции, куда снизу поступает расплав, который из-за дегазации разогревается значительно. Это адиабатический процесс, и выделяющееся тепло не отводится в боковые породы, а расходуется на плавление раннего плагиоклаза. Отсутствие теплоотвода связано с высокой скоростью подъема новой порции расплава вдоль краевой (кольцевой) щели.

Для отражения условий кристаллизации в центре штока применима огибающая кривая солидуса

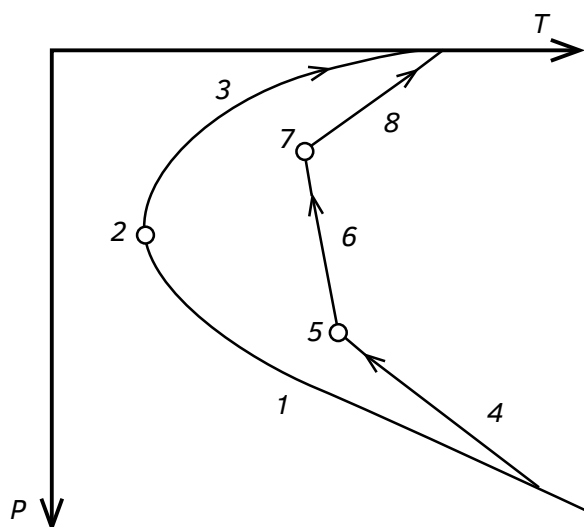


Рис. 3. Кривые солидуса для центра штока (1—3) и для края штока (4—8)

Fig. 3. Solidus curves for the center of the stem (1—3) and for the edge of the stem (4—8)

(рис. 3) [4, 5], где на фоне декомпрессии имеется четкий температурный минимум без промежуточного плавления. Отрезок 1 приходится на стадию сопряженного снижения T и P_{H_2O} при кристаллизации плагиоклаза (после магнетита и биотита). Точка 2 означает завершение снижения температуры перед ростом. Ее маркирует эвтектическое сочетание плагиоклаза фиксированного состава и кварца при температурном минимуме и связанных значениях T и P_{H_2O} [22]. Отрезок кривой 3 выражает конечный адиабатический разогрев остаточного расплава из-за декомпрессии и его застывание в форме стекла без микролитов.

Для отражения условий кристаллизации у края штока применима внутренняя кривая (см. рис. 3) с прямолинейным отрезком повторного плавления [4]. Этот отрезок заменяет точку 2 фазового равновесия в центре штока. Отрезок кривой солидуса 4 смещен в область высоких температур, чему соответствует раннее и обильное выделение пироксена (вместо магнетита и биотита). На этот же отрезок приходится и кристаллизация раннего плагиоклаза с появлением в точке 5 кварца. Отрезок 6 отражает инконгруэнтное плавление плагиоклаза при затрате тепла и небольшом снижении температуры на фоне существенного снижения давления. В точке 7 ранний плагиоклаз исчезает и начинается кристаллизация его мелких микролитов. При этом выделяется скрытая теплота плавления [4, 6], которая не отводится, и конечная температура повышается (8).

Приведенные данные показывают, что условия кристаллизации в центре и на краю штока сильно отличались. На краю штока по сравнению с его центром падает флюидное давление, из-за чего кристаллизация и окончательное затвердевание идут при более высокой температуре. Поэтому здесь меняется состава цветных минералов и появится ранний плагиоклаз, лишь частично сохраняющийся внутри кварца.

Отсутствие постепенного перехода от «горячей» краевой к более «холодной» центральной зоне штока и разница в составе продуктов кристаллизации прямо указывают на повторное внедрение расплава вдоль края штока. Очевидно, что появление свободного пространства, куда поступает новый расплав, вызвано контракцией — краевым отслоением, то есть уменьшением объема при затвердевании центра. Общая ширина сохраняется, но возникает зональность. Предлагаемая модель краевой контракции отличается от модели постепенной кристаллизации колонны расплава от края к центру [4].

Известно, что контракция проявляется по-разному в зависимости от состава расплава и степени его насыщения водой. Например, в гранитных массивах, где сокращение объема значительное и составляет 8—9% [13], трещины контракции заполнены пегматитами в широкой приконтактной зоне. Для крымского штока кварцевых долеритов проблематичной является не сама контракция, а ее смещение в узкую краевую зону. Видимо, здесь сказывается такое свойство расплава, как его вязкость. У основных расплавов, включая расплав кварцевого долерита, вязкость намного ниже, чем у гранитного. Но вязкость зависит от температуры, а главное, от давления воды, причем зависит нелинейно. Для гранитного расплава по Э.С. Персикову [14] при давлении воды 1 кбар его вязкость в 10^5 ниже, чем у «сухого» расплава. Расплав кварцевых долеритов в принципе менее вязкий, чем гранитный, да и давление воды на краю штока остается значимым ($\geq 0,5$ кбар). Поэтому объем сокращается в самый последний момент затвердевания, а контракция имеет форму краевого кольцевого отслоения.

Заполнение кольцевого отслоения, идущее с ростом температуры и падением давления, меняет не только структуру породы, но частично и ее состав. В составе кварцевых долеритов на краю штока по сравнению с центром уменьшается доля Mg при таком же содержании Fe (см. табл.).

Окончательное затвердевание расплава в краевой (кольцевой) зоне также сопровождается контракцией, но уже в форме образования многочисленных секущих трещин. В большинстве они ориентированы радиально, то есть поперек контакта, а отдельные, наиболее крупные трещины выходят во вмещающие породы и в центральную часть штока. Все они заполняются гидротермальными растворами, а затем — низкотемпературными минералами. В промежутках между трещинами контракции породы краевой части штока очень сильно изменены.

Характеристика поздних изменений в центре и на краю штока

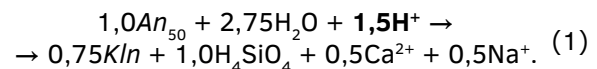
Поздние процессы развиваются при гораздо более низкой температуре, чем в момент затвердевания расплава. Их интенсивность особенно сильно проявлена на краю штока, из-за чего породы здесь выглядят белесыми и местами рыхлыми, тогда как породы в осевой части — серые и плотные.

В центре штока (табл., проба 1а) первичная магматическая структура кварцевых долеритов просматривается регулярно (см. рис. 1а, б),

несмотря на обилие вторичных минералов. Исходные минералы изменяются по-разному. Например, акцессорный магнетит сохраняется, а биотит замещен хлоритом. Цементирующее стекло замещается каолинитом всюду и полностью. Показательно неравномерное изменение плагиоклаза и кварца. Есть места, где они целиком присутствуют в первичном виде. Но в других местах они изменяются, причем последовательно, отражая три стадии смены условий. Здесь сначала плагиоклаз, находящийся за пределами зерен кварца, превращается в псевдоморфозы каолинита. Затем плагиоклаз, включенный в кварц, растворяется и замещается кварцем без участия каолинита. Позже и по плагиоклазу, и по кварцу развивается кальцит. Последовательная смена реакций и сохранение структур соответствуют диффузии с изменением химической активности застойного раствора на фоне снижения температуры.

Характер замещений на всех трех стадиях весьма специфичен. Начальные псевдоморфозы каолинита по плагиоклазу сохраняют первичную форму таблиц. Иногда псевдоморфозы имеют двойное строение. Их широкий центр сложен каолинитом, а очень узкая краевая оболочка (футляр) — раскисленным плагиоклазом ($An_{\sim 20}$) (рис. 4а). Здесь же видно, что каолинит и кислый плагиоклаз предшествуют кальциту.

Замещение широкого центра плагиоклаза An_{50} каолинитом $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ протекает в реакции (1)² при инертном поведении Al (раствор насыщен глиноземом):



Кислотности реакции (протоны слева) соответствует вынос Ca и Na. Также это гидролиз, идущий с выделением тепла, направленным против общего снижения температуры. Десиликация с переводом кремнезема в раствор отражает диффузионный тип замещения при застойном растворе [10]. Образование каолинита начинается при снижении температуры до 260 °С [2]. Кислотность, скорее всего, обеспечивается полной (относительно высокотемпературной) начальной диссоциацией угольной кислоты.

На стыке плагиоклаза и стекла проявляется разная скорость их замещения.

² An_{50} — плагиоклаз и содержание анортитовой молекулы (%), Arg — арагонит, Cc — кальцит, Hem — гематит, $H-mic$ — гидрослюда, Kln — каолинит, Qtz — кварц, Ser — серицит, Sid — сидерит, L — расплав.

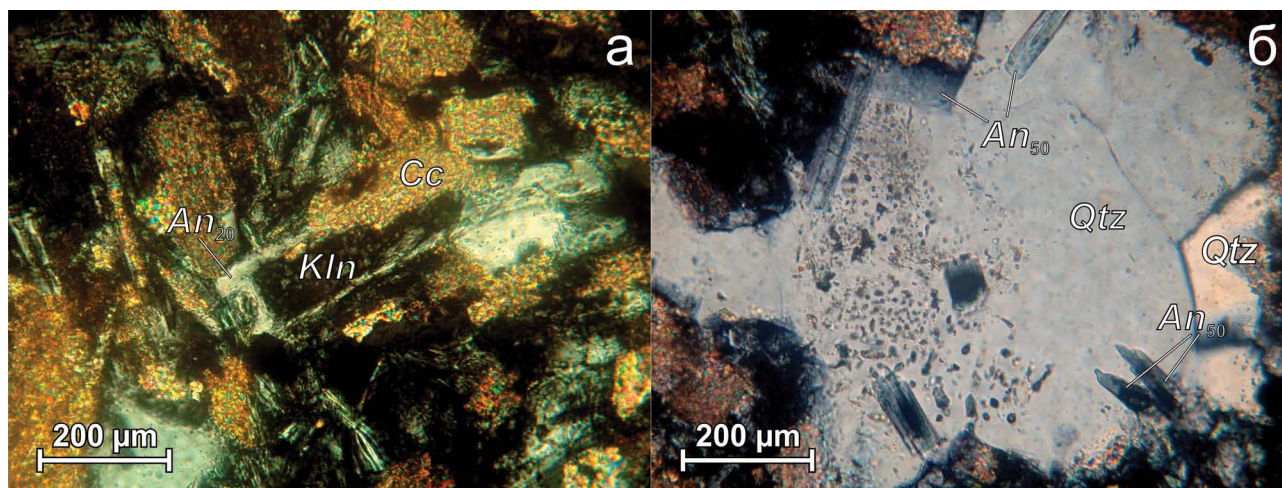
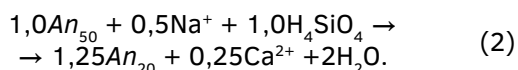


Рис. 4. Метасоматические изменения в центре штока: а) псевдоморфозы по таблицам плагиоклаза с внутренней зоной каолинита и наружной зоной кислого плагиоклаза (An_{20}), а также с поздним наложением кальцита; б) скопление газожидких включений в кварце и растворение плагиоклаза An_{50} , а также наружное слоевое нарастание позднего кварца без включений (оба с анализатором)

Fig. 4. Metasomatic changes in the center of the stem: а) pseudomorphoses according to plagioclase tables with an inner zone of kaolinite and an outer zone of acidic plagioclase (An_{20}), as well as with late calcite overlay; б) accumulation of gas-liquid inclusions in quartz and dissolution of plagioclase An_{50} , as well as an outer layer build-up of late quartz without inclusions (both with analyzer)

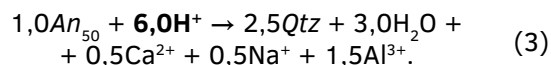
Из-за более быстрого превращения стекла в каолинит раствор на границе с плагиоклазом обогащается Na и Si. В результате край плагиоклаза не замещается каолинитом, а раскисляется:



Если объемный эффект реакции (1) отрицательный ($\Delta V = -26,0 \text{ см}^3/\text{моль}$), то в реакции (2) он положительный и почти такой же по величине ($\Delta V = +24,9 \text{ см}^3/\text{моль}$). Но сочетание обеих реакций не дает объемного баланса, поскольку кайма кислого плагиоклаза заведомо более узкая, чем широкий каолинитовый центр. В результате сокращения объема в породе появляется пористость.

Кварц никак не изменяется, когда за его пределами плагиоклаз массово замещается каолинитом. Более того, кварц предохраняет от замещения каолинитом содержащиеся в нем таблитчатые включения плагиоклаза. Но после массового развития каолинита начинает изменяться и кварц. Он разрастается, а плагиоклаз внутри него начинает растворяться (рис. 4б). В местах растворения плагиоклаза в кварце появляются обильные газожидкие включения, а на периферии разрастающийся кварц приобретает признаки слоевого роста в форме прямолинейных границ зерен. Каолинит в этом процессе не участвует.

Растворение плагиоклаза внутри кварца (см. рис. 4б) идет весьма специфически. Длина таблиц плагиоклаза сокращается, так как они растворяются со стороны торцовых граней (001). Это происходит из-за проникновения раствора сразу вдоль двух систем спайности — (010) и (100). Торцовые грани плагиоклаза становятся изъеденными, а боковые остаются ровными, но их длина укорачивается. Избирательное взаимодействие граней плагиоклаза с раствором отражает диффузионный тип процесса, при котором пораи служат трещины спайности плагиоклаза. Замещение плагиоклаза кварцем представляет кислотную реакцию (3) при инертном поведении Si:



Высокой кислотности ($6,0H^+$ слева) соответствует вынос в раствор Ca и Na, а также форма выноса Al (раствор насыщен кремнекислотой) [3]. Вода синтезируется в реакции и служит основой газожидких включений, возникающих внутри кварца на месте растворяющегося плагиоклаза. Увеличение кислотной активности раствора в реакции (3) по сравнению с реакцией образования каолинита (1) объясняется тем, что реакция (3) протекает внутри кварца, где нет нейтрализации во встречной диффузии со стороны стекла. Кислотность реакции (3), по-видимому, создает

хлор, присутствующий во включениях в кварце (см. ниже). Формально реакция (3) может быть записана как растворение плагиоклаза в сильной соляной кислоте (6HCl) с выносом хлоридов металлов. Объемный эффект реакции (3) резко отрицательный ($\Delta V = -41,17 \text{ см}^3/\text{моль}$), еще более увеличивающий пористость породы. Именно поэтому кварц с газово-жидкими включениями обрастает поздним кварцем уже без включений, но с признаками медленного слоевого роста (см. рис. 46). Этот дополнительный кварц представляет продукт разложения подвижного кремнезема ($\text{H}_4\text{SiO}_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$), вынесенного в реакции (1) и не полностью реализованного в реакции (2).

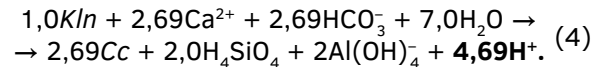
Для оценки условий протекания реакции (3), в которой растворяется плагиоклаз и образуется кварц с газово-жидкими включениями, был проведен термобарогеохимический анализ. Объектом служили двухфазные газово-жидкие включения, а целью являлась фиксация температур фазовых переходов (микротермокамера THMSG-600, исполнитель М.М. Комарова). Температура гомогенизации ($T_{\text{гом}}$) устанавливалась по точке перехода газа в раствор. Диапазон $T_{\text{гом}}$ укладывается в интервал от 309 до 132 °С. Температура эвтектического затвердевания ($T_{\text{эвт}}$) находится в диапазоне от -28 до -23 °С, что соответствует водному раствору с невысоким содержанием NaCl (1,05—5,57%) [16]. Наличие хлорида натрия во включениях позволяет считать, что хлор присутствовал в исходном расплаве. Наиболее высокую температуру гомогенизации (309 °С) дает лишь одна точка, а все остальные замеры приходятся на интервал 132—250 °С, который принят за основу оценки температур (рис. 5). В системе этих точек просматривается закономерность: в центре скоплений газово-жидких включений температура гомогенизации выше (160—250 °С), чем на краю (132—160 °С). На краевые низкие температуры приходится и слоевое заполнение пустот кварцем без газово-жидких включений. Водно-хлоридный состав включений объясняется синтезом воды в реакции (3), кислотность которой обеспечивается хлором.

Усиление кислотной активности растворов при переходе от реакции (1) к реакции (3) вызвано сменой кислот (угольной на хлористоводородную). В реакции (1) остаточный раствор насыщается кремнеземом, а в реакции (3) — глиноземом. Выносу Si и Al способствует увеличение пористости из-за уменьшения объема твердых фаз в обеих реакциях.

Появление кальцита указывает на переход от кислотных условий к щелочным. Важно

отметить, что кальцит развивается не беспорядочно. В частности, можно видеть, что в псевдоморфозах по плагиоклазу кальцит избирательно замещает только каолининовое ядро и не распространяется на олигоклазовую кайму (рис. 6а).

Кальцит по каолиниту образуется в реакции:



Из-за отсутствия в минералах общего катиона реакция (4) рассчитана на равенство объемов твердых фаз (каолинита и кальцита). Щелочность реакции (протоны справа) обеспечивается неполной диссоциацией угольной кислоты при низкой температуре ($\text{pH} \sim 9,9$, 150 °С при 1 кбар [20]). Низкотемпературным условиям соответствует гидролиз, а щелочности — приведенная форма выноса алюминия [3]. Замещение кальцитом только каолининового ядра отражает застойное состояние раствора, то есть диффузию. Десиликация также прямо указывает на диффузию [10].

Кальцит также избирательно и весьма активно развивается по «новому» кварцу с гранными формами и без газово-жидких включений (рис. 6б). При этом он почти не затрагивает сохранившийся рядом плагиоклаз, что указывает на застойное состояние раствора (диффузионное замещение). Кварц же замещается кальцитом весьма агрессивно, что показано на рисунке 7. Реакция также рассчитана на равенство объема твердых фаз (кварца и кальцита):

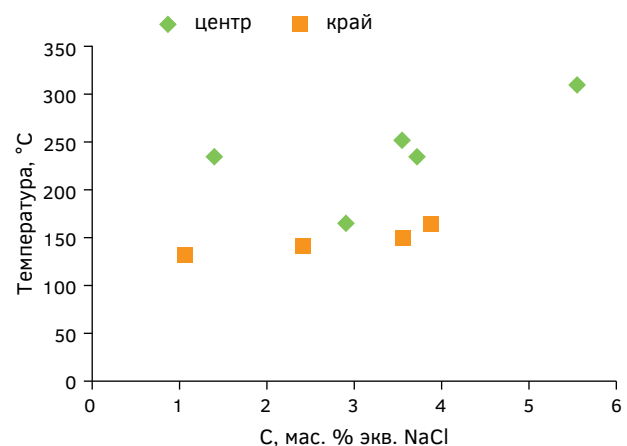


Рис. 5. Диаграмма: температура гомогенизации — концентрация солей на краю и в центре скоплений газово-жидких включений

Fig. 5. Diagram: homogenization temperature — concentration of salts at the edge and in the center of accumulations of gas-liquid inclusions

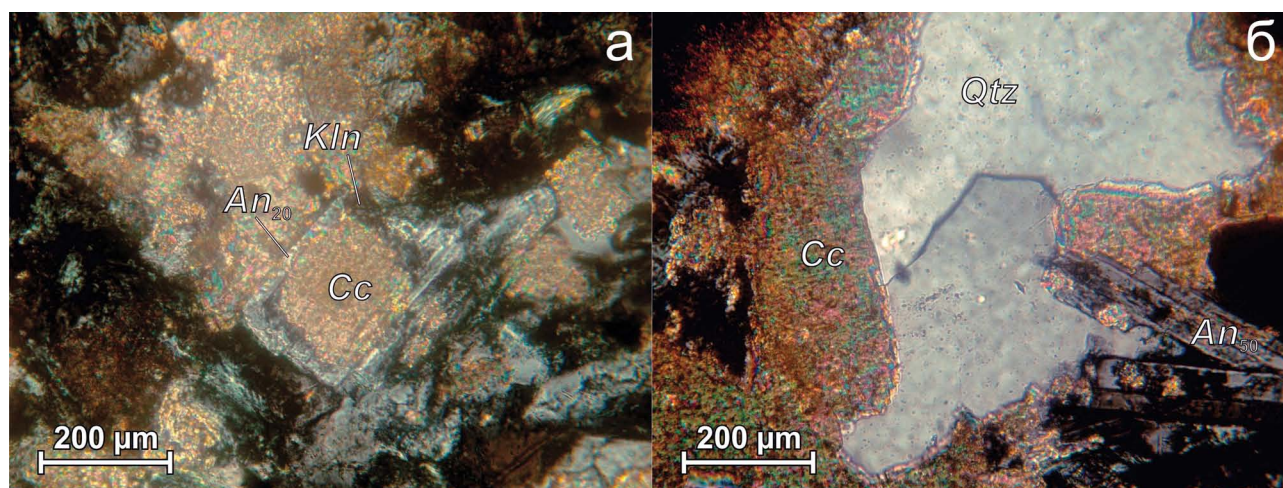
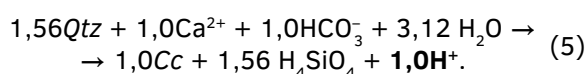


Рис. 6. Образование позднего кальцита в центре штока: а) замещение кальцитом каолинитового ядра псевдоморфоз по плагиоклазу; б) замещение кальцитом позднего кварца, имеющего признаки гранного роста (с анализатором)

Fig. 6. Formation of late calcite in the center of the stem: a) calcite replacement of the kaolinite core of pseudomorphs by plagioclase; б) calcite replacement of late quartz with signs of faceted growth (with analyzer)



Как и реакция (4), это щелочная десиликация при активном участии воды.

Итак, в смене приведенных реакций (1—5) участвуют угольная кислота с ее двойной диссоциацией и хлор. Четкая последовательность обеспечивается застойным состоянием растворов и сменой влияния анионов по мере снижения температуры: CO_3^{2-} (каолинит по плагиоклазу, слабая кислотность, $\sim 260^\circ C$) $\rightarrow Cl^-$ (кварц по плагиоклазу,

сильная кислотность, $\sim 132—250^\circ C$) $\rightarrow HCO_3^-$ (кальцит по каолиниту и кварцу, щелочность, $\leq 132^\circ C$).

В промежуточной стадии проявляется активность хлора. Дополнительный эффект представляет уменьшение объема твердых фаз в реакциях (1, 3). Возникающая пористость в условиях общей декомпрессии нарушает застойное состояние раствора и способствует выносу Al и Si. Этим объясняется низкое содержание SiO_2 в породе (см. табл., анализ 1а).

В краевой части штока (табл., проба 1б) постмагматические изменения кварцевых долеритов намного более сильные, чем в центре, и при этом качественно иные. Здесь замещены все магматические минералы, кроме кварца и мелких включений плагиоклаза внутри кварца. Если снова обратиться к рисунку 2, видно, что магматические структуры сохраняются. Правда, они выглядят контрастно из-за темных гематит-сидеритовых псевдоморфоз по пироксену и светлых псевдоморфоз гидрослюда и каолинита по стеклу и микролитам плагиоклаза в стекле. Характерно также обилие прожилков с гематитовыми краями и сидеритовым центром. Иногда они ответвляются от псевдоморфоз по пироксену. Но большинство таких прожилков представляет заполнение секущих радиальных трещин. Ниже показано образование псевдоморфоз, а затем заполнение трещин и пустот.

Плагиоклаз микролитов преобразован в каолинитовые псевдоморфозы, но вдоль наружного слоя отдельных псевдоморфоз развивается узкая пластинка гидрослюда (см. рис. 2е). Это напоминает

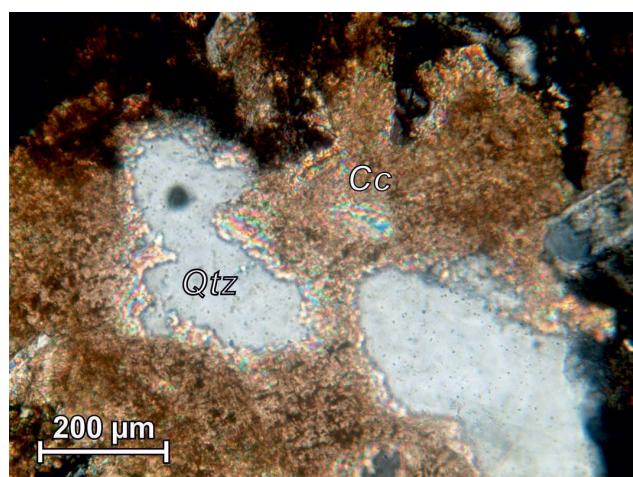
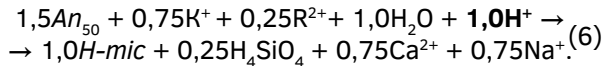


Рис. 7. Замещение кварца кальцитом (с анализатором). Темная точка на кварце — дефект шлица

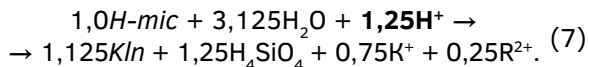
Fig. 7. Replacement of quartz with calcite (with analyzer). A dark dot on quartz is a defect of the slot

похожее явление в центре штока, где край раннего плагиоклаза An_{50} замещается в реакции (1) более кислым плагиоклазом An_{20} , а в середине развивается каолинит. На краю штока замещение плагиоклаза микролитов (условно An_{50}) гидрослюдой происходит с привнесением калия и оснований со стороны наружного каолинита по стеклу. Эта начальная реакция (6) имеет кислотную направленность и протекает с выносом кремнезема (диффузия):



Состав гидрослюды принят по [12]: $K_{0,75}(Al_{1,75}R^{2+}_{0,25})Si_{3,5}Al_{0,5}O_{10}(OH)_2$, где R^{2+} — Mg, Fe. По сравнению с реакцией (1) в реакции (6) требуется меньше воды, то есть она более высокотемпературная. Судя по меньшему количеству H^+ на единственный плагиоклаз, реакция (6) менее кислотная, чем (1). Калий оказывается в растворе из-за того, что он не реализуется на магматической стадии (пироксен вместо биотита). Основания (R^{2+}) поступают из-за параллельного изменения смежного пироксена. Расчет реакции (6) показывает уменьшение объема твердых фаз ($\Delta V = -5,2 \text{ см}^3/\text{моль}$).

Дальнейшее превращение гидрослюды и в итоге самих микролитов в каолинит представляет следующую, более кислотную, реакцию:



Это тоже десиликация, но уже с выносом калия и оснований. Реакция идет при явном снижении температуры, так как усиливается гидролиз. Ее объемный эффект тоже отрицательный ($\Delta V = -33,8 \text{ см}^3/\text{моль}$). Начальная гидрослюда образуется при $\leq 300^\circ\text{C}$ [12] в реакции (6), а при 260°C ее сменяет каолинит (7). Из-за сокращения объема здесь возникает масса мелких пустот.

Пироксен полностью превращен в зональные псевдоморфозы гематита, сидерита и каолинита, нередко сохраняющие его первичную форму (рис. 8а, б). Это, как и вынос кремнезема в раствор, прямо указывает на диффузию [10]. В раствор также переходят Ca и щелочи. Железо перераспределяется между гематитом и сидеритом, которые формируют сетчатую, ячеистую и скелетную структуру псевдоморфоз. Гематитом очерчен внешний контур псевдоморфоз и границы ячеек вдоль спайности. Сами ячейки в большинстве заполнены сидеритом, но некоторые (центральные) — каолинитом. Скелетные псевдоморфозы отражают сохранность первичной формы пироксена.

Преимущественно сидеритовый состав псевдоморфоз по пироксену обеспечивается начальной кислотной (полной, высокотемпературной) диссоциацией угольной кислоты. Сочетание сидерита и гематита представляет связь окислительно-восстановительных реакций с переводом $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ и $HCO_3^- \rightarrow CO_3^{2-}$. Первая (окислительная) реакция отражает локальное повышение щелочности при отложении гематита, а вторая (восстановительная) — общую высокую кислотность с отложением сидерита.

Краевую зону штока отличает не только интенсивное замещение ранних минералов, в том числе развитие гематита и сидерита по пироксену. Но также характерно их отложение в мелких пустотах и микротрещинах. Нередко такие микротрещины отвечают от псевдоморфоз по пироксену (см. рис. 8а, б), отражая уменьшение объема в реакции. Наружную зону таких трещин занимает гематит, а внутреннюю — сидерит. Соединяясь, такие микропрожилки образуют раздувы, края которых обрамлены гематитом. От гематита в направлении центра растёт сидерит с гранными формами, а центр этих раздувов нередко заполняется монокристаллическим кальцитом (рис. 8в, г). Смена карбонатов означает переход застойного раствора от кислотного (сидерит) к щелочному (кальцит). Карбонаты в форме монокристаллов растут, когда скорости расширения и заполнения трещин сопоставимы. В этом случае происходит так называемый «медленный» рост кристаллов (он же слоевой, гранный, тангенциальный).

Есть также другой, довольно редкий, тип отложения карбонатов, когда они заполняют не развивающиеся трещины, а пассивно отлагаются в пустотах, возникших при затвердевании расплава, которые принято называть миароловыми. Большую часть объема таких полостей заполняет сидерит (уже без гематита) с характерной радиально-лучистой почковидной структурой (рис. 8д, е). Вдоль границы с центральной пустотой отлагается узкая лучистая кайма арагонита (вместо кальцита). Такая структура карбонатов характерна для «быстрого» (неслоевого, нетангенциального, «нормального») роста.

Принципы слоевого гранного (медленного) и неслоевого «нормального» (быстрого) роста даны в работе А.А. Чернова [18]. В ней подчеркивается, что медленный слоевой рост достигается при отсутствии пересыщения или переохлаждения, то есть при равновесии. Этому способствует медленное развитие мелких трещин. Если же отложение происходит не в развивающихся трещинах,

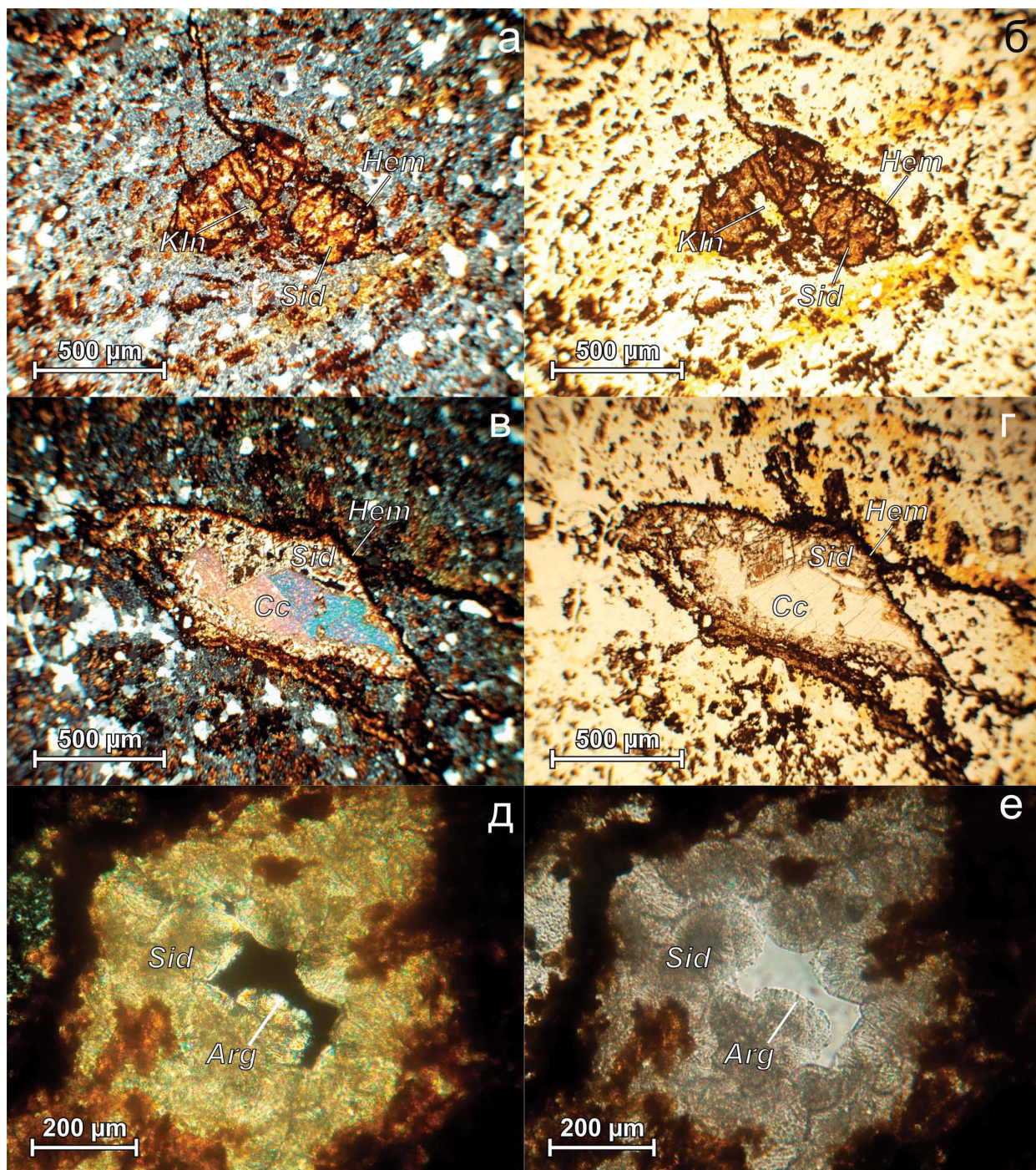


Рис. 8. Поздние метасоматические изменения на краю штока: а) псевдоморфоза сидерита с каймой гематита по пироксену (с анализатором); б) то же без анализатора; в) слоевое заполнение пустот сидеритом (вдоль края) и кальцитом (в центре) и наружной каймой гематита или гидроксидов железа (с анализатором); г) то же без анализатора; д) радиальное заполнение пустот начальным сидеритом и поздним арагонитом вдоль границы с центральной полостью (с анализатором); е) то же без анализатора

Fig. 8. Late metasomatic changes at the stem edge: а) pseudomorphosis of siderite with hematite border by pyroxene (with analyzer); б) the same without analyzer; в) layered filling of voids with siderite (along the edge) and calcite (in the center) and an outer hematite border or iron hydroxides (with analyzer); г) the same without analyzer; д) radial filling voids of initial siderite and late aragonite along the border with the central cavity (with analyzer); е) the same without analyzer

а в полостях с запасом пустого пространства, то возникает градиент насыщения и индивидуальности минералов (в нашем случае карбонатов) растут быстро с образованием радиально-лучистых структур. Оба способа роста представляют заполнение трещин или пустот путем кристаллизации застойного раствора, в котором начальные кислотные условия сменяются щелочными.

Подчеркнем, что гематит фиксирует начало развития трещин, то есть момент накопления напряжений, очерчивая наружную зону прожилков и их раздувов (см. рис. 8а–г). Но он не отлагается в миароловых пустотах (см. рис. 8д, е).

Приведенная характеристика поздних изменений показывает, что на краю штока они несравненно сильнее, чем в центре. Очевидна связь обильных радиальных трещин контракции и массового низкотемпературного метасоматоза в краевой зоне штока. Из-за расширения трещин раствор в них охлаждается [19], как и поровый раствор в промежутках между трещинами контракции. Это охлаждение усиливает кислотную активность раствора, из-за чего в краевой зоне штока возникают массовые силикатные псевдоморфозы. Характерно, что уменьшение объема проявляется не только в форме радиальных трещин контракции. Сами низкотемпературные реакции идут с уменьшением объема твердых фаз, что приводит к росту пористости и образованию микротрещин (см. рис. 8а, б). Общей причиной служит продолжающаяся декомпрессия. В отсутствие расплава она охлаждает раствор и способствует удалению вверх подвижных продуктов реакций. В этих продуктах доминируют основания и кремнезем. Когда кислотный ресурс раствора исчерпывается, удаленное в реакции 7 железо отлагается в форме гематитовых пятен без сидерита (см. рис. 2д, е). Что касается кремнезема, то на краю штока он удаляется и из-за этого в породе наблюдается низкое содержание SiO_2 (см. табл., анализ 1б). Лишь иногда можно видеть отдельные мелкие прожилки кварца, которые пересекаются прожилками кальцита. Это показывает, что образование трещин продолжается до самых низких температур того же уровня ($\leq 132^\circ\text{C}$), что и в центре штока.

Боковые породы

Вмещающие алевритистые аргиллиты непосредственно на границе со штоком и в 1 м от нее имеют одинаковый устойчивый химический состав (см. табл., пробы 1в, 1г) без признаков выноса SiO_2 . Минеральный состав представляют кварц (~5–10%), слюдисто-каолиновый цемент (80–85%),

гидрооксиды железа (до 10%), кальцит (сл.). Кварц — зерна типичного обломочного вида размером от 0,05 до 0,2 мм. Основу цемента составляет каолинит, по которому развивается мелкая гидрослюда, переходящая в чешуйки серицита, обозначая прогрессивный тип изменений. Равномерное слабое ожелезнение проявлено в форме рассеянных агрегатов гидрооксидов железа размером $\leq 0,1$ мм. Иногда в них встречаются мелкие зерна магнетита. Структура пород псамо-пелитовая. В алевритистых аргиллитах рядом со штоком встречаются поздние гнезда слюдисто-карбонатного агрегата, состоящего из иллита и анкерита (?). Независимо от них развита поздняя сеть тонких прожилков сидерита с каймой гематита, переходящего в гидрооксиды железа. Сеть аналогична системе тонких прожилков в краевой зоне штока.

Ассоциация каолинита и гидрослюда в цементе пород, примыкающих к штоку, соответствует разогреву до $\leq 300^\circ\text{C}$ под термическим (но не флюидным) влиянием штока. Разогрев боковых пород по принципу кондуктивной передачи тепла происходит только после затвердевания расплава. Уровень этих изменений такой же низкотемпературный, как и в самом штоке. Отсутствие высокотемпературного влияния расплава на боковые породы прямо указывает на адиабатическое состояние [4] системы расплав — кристаллы в штоке.

Модель формирования пород штока

Зональное строение штока с повторным кольцевым внедрением расплава и массовые низкотемпературные изменения связаны друг с другом через явления контракции и декомпрессии. Причем общий фон создает сквозная декомпрессия, а контракция проявляется дважды. Начальная контракция происходит в момент первого затвердевания штока и имеет форму узкого кольцевого отслоения, которое снизу заполняется новым расплавом. Декомпрессия в кольцевой зоне усиливается, что приводит к адиабатическому разогреву расплава примерно на 200°C по сравнению с широким центром. Краевая контракция служит причиной мобилизации расплава и его перемещения вверх к вулканическому аппарату.

Окончательное затвердевание краевого кольца снова сопровождается контракцией с образованием обильных поперечных (радиальных) трещин, которые заполняются уже не расплавом, а раствором. Он не поступает извне, а представляет мобилизацию межзернового застойного (порового) раствора, с которым связан массовый диффузионный метасоматоз. В трещинах отлагаются

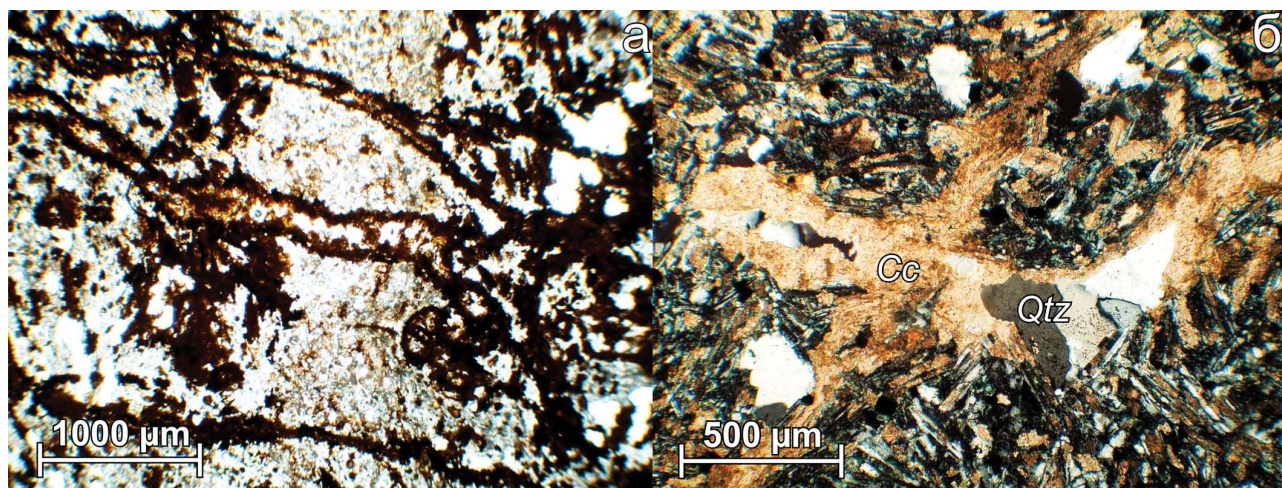


Рис. 9. Позднее заполнение трещин и полостей: а) трещины, заполненные сидеритом и гематитом на краю штока (без анализатора); б) полости, заполненные кварцем и наложенным кальцитом в центре штока (с анализатором)

Fig. 9. Late filling of cracks and cavities: а) cracks filled with siderite and hematite at the edge of the stem (without analyzer); б) cavities filled with quartz and superimposed calcite in the center of the stem (with analyzer)

новые минералы, характерные только для края штока. Главные из них — железистый карбонат и гематит (рис. 9а), из-за которых прожилки

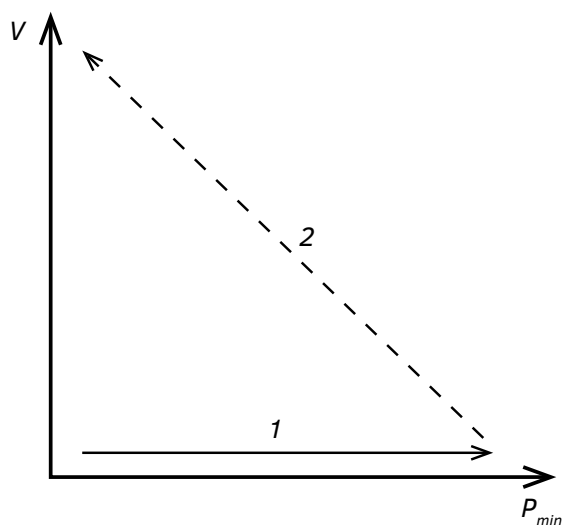


Рис. 10. Изменение давления на минералы (P_{min}) и объема твердых фаз (V) по стадиям: 1 — накопление напряжений (рост давления на минералы при сохранении объема); 2 — снятие напряжений (сброс давления при образовании трещин и увеличении объема, компенсирующее уменьшение объема в реакциях)

Fig. 10. Changes in pressure on minerals (P_{min}) and volume of solid phases (V) by stages: 1 — accumulation of stresses (increase in pressure on minerals while maintaining volume); 2 — stress relief (pressure relief during crack formation and volume increase, compensating for volume reduction in reactions)

выглядят контрастно. Обильные, часто сплошные, новообразования характерны именно для края штока. В центре штока изменения не сплошные и поэтому там лучше видна стадийность. Особенно хорошо проявлено гнездовое наложение кварца, а затем — позднего кальцита (рис. 9б).

Неизбежность резкого снижения температуры при переходе к метасоматозу связана с механической работой, затраченной на массовое образование радиальных трещин контракции. Реализация механической работы ($-PV$) объединяет начальный рост напряжений (P) перед образованием трещин со снятием напряжений и увеличением объема (V) при образовании трещин. Внутренняя энергия системы снижается ($\Delta U = -PV$). На рисунке 10 по горизонтали обозначен рост напряжений, а по диагонали — их снятие при образовании радиальных трещин с увеличением объема. Однако общий объем породы в кольцевой зоне остается на первоначальном уровне, потому что между трещинами идет замещение минералов с уменьшением объема.

Эту же стадийность (1, 2 на рис. 10) показывает двойное заполнение трещин (см. рис. 8в, г, 9а). Начальный рост напряжений (1) маркирует кайма плотного гематита, а снятие напряжений (2) — менее плотный карбонатный центр.

Вопрос состоит в том, куда и как при этом отводится тепло от пород штока, затвердевание которых происходит при высокой температуре, а массовое вторичное замещение идет при низкой температуре. По Д.С. Коржинскому [9] при переходе системы на более низкий уровень внутренней энергии

часть потенциальной энергии системы рассеивается во внешней среде в форме тепла. Если по-другому, это отвод тепла во вмещающие породы. Но в нашем случае нет признаков разогрева вмещающих пород (ороговикования). Очевидно, что если нет передачи тепла во внешнюю среду, то фактором снижения температуры является расширение флюида в трещинах контракции и его адиабатическое охлаждение [19].

Связь механической работы, затраченной на образование трещин, и немедленного адиабатического охлаждения заполняющей их флюидной фазы далеко не всегда очевидна. Например, в литературе [1, 19] детально освещено охлаждение гидротермального флюида, вызванное расширением и падением давления в поствулканических процессах на дне океана. Но при этом механическая составляющая не рассматривается. Для нашего случая она крайне важна, так как помимо охлаждения имеет значение его скорость.

Высокая скорость развития радиальных трещин контракции сопряжена с быстрым адиабатическим охлаждением раствора не только внутри самих трещин, но и межзернового (застойного) раствора в промежутках между трещинами. Фактически происходит разделение энергетических затрат — механической работы на образование трещин и охлаждения раствора внутри этих трещин. Охлаждение раствора в краевом «кольце» происходит гораздо быстрее, чем кондуктивная передача этому раствору тепла от горячего и ранее затвердевшего «центра». Более того, межзерновой раствор охлаждается не только на краю штока, но фрагментарно в центре, судя по неравномерным вторичным изменениям.

Такого рода процессы, которые идут с более высокой скоростью, чем теплообмен с окружающей средой, относятся к особой категории, а именно к категории «быстрых» процессов [11]. То есть наблюдается связанный переход от совершения механической работы ($-PV$) к снижению температуры. Последнее уменьшает величину TS в уравнении внутренней энергии при постоянстве энтропии (изоэнтропическое охлаждение [19]).

Показанные выше реакции, сопутствующие образованию трещин, в большинстве представляют гидролиз, а значит, идут с выделе-

нием тепла (экзотермические реакции). Это выделение тепла направлено против охлаждения растворов в расширяющихся трещинах и межзерновых порах. Сквозная декомпрессия приводит к частичному удалению подвижного кремнезема, усиливая отрицательный объемный эффект реакций и рост пористости.

Итак, последовательность минералообразования в породах штока подчинена смене температур на фоне декомпрессии в адиабатических условиях. Ее главные особенности сводятся к следующему.

1. Шток кварцевых долеритов затвердевает с контракцией в форме краевого кольца, куда снова поступает расплав при декомпрессии и адиабатическом разогреве с повторным плавлением кристаллов и образованием стекла.

2. Температура затвердевания расплава на краю штока ($1175\text{ }^{\circ}\text{C}$) выше, чем в центре ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$), а давление воды ($0,5\text{ кбар}$) ниже, чем в центре (2 кбар).

3. Окончательное затвердевание краевой зоны сопровождается повторной контракцией в форме радиальных трещин, заполненных раствором.

4. Реализация механической работы при образовании радиальных трещин контракции снижает уровень внутренней энергии системы.

5. Расширение радиальных трещин вызывает быстрое адиабатическое охлаждение растворов, включая поровые, до $300\text{—}132\text{ }^{\circ}\text{C}$ и активизацию кислотных компонентов.

6. На краю штока кислотный диффузионный метасоматоз между радиальными трещинами приводит к массовому образованию псевдоморфоз при сохранении магматической структуры.

7. В центре штока из-за фрагментарного охлаждения застойного раствора идет последовательная смена диффузионных реакций, когда слабое кислотное и сильное щелочное влияние угольной кислоты разделено активностью хлора.

8. Уменьшение объема твердых фаз в большинстве метасоматических реакций и увеличение пористости связано с доминирующей декомпрессией.

9. Декомпрессия приводит к удалению части подвижного кремнезема через возникающие поры и трещины с вероятным переотложением наверху в виде агата и сердолика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000. 304 с.
2. Иванов И.П. Термодинамическое моделирование минеральной зональности на примере системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O--HCl}$ // Очерки физико-химической петрологии. М.: Наука, 1991. Вып. XVII. С. 36—57.
3. Иванов И.П., Ткаченко Н.А. Анализ парагенезисов

- минералов и моделирование зональности кислотных метасоматитов // Экспериментальное и теоретическое моделирование процессов минералообразования. М.: Наука, 1998. С. 173—188.
4. Кадик А.А., Луканин О.А., Лапин И.В. Физико-химические условия эволюции базальтовых магм в приповерхностных очагах. М.: Наука, 1990. 346 с.
 5. Кадик А.А., Френкель М.Я. Термодинамика декомпрессии водосодержащего магматического расплава (на примере системы альбит–вода) и роль понижения давления в механизме магнеобразования // Геохимия. 1980. № 3. С. 307—334.
 6. Кадик А.А., Френкель М.Я. Декомпрессия пород коры и верхней мантии как механизм образования магм. М.: Наука, 1982. 120 с.
 7. Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов: Пер. с англ. М.: Недра, 1997. 248 с.
 8. Корнейко А.А., Веселовский Р.В. Новые данные о палеомагнетизме среднеюрского магматического комплекса долины р. Бодрак (Горный Крым) // Вестник МГУ. Сер. Геология, 2013. С. 10—17.
 9. Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука, 1973. 288 с.
 10. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. 2-е изд., доп. М.: Наука, 1982. 103 с.
 11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Статистическая физика. М.: Наука, 1964. Т. 5. 567 с.
 12. Метасоматизм и метасоматические породы / Жариков В.А., Русинов В.Л., Маракушев А.А. и др. М.: Научный мир, 1998. 492 с.
 13. Осипов М.А. Контракция гранитоидов и эндогенное минералообразование. М.: Наука, 1974. 156 с.
 14. Персигов Э.С. Вязкость магматических расплавов. М.: Наука, 1984. 160 с.
 15. Перчук Л.Л. Термодинамический режим глубинного петрогенеза. М.: Наука, 1973. 318 с.
 16. Реддер Э. Флюидные включения в минералах: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. Т. 1. 558 с.
 17. Спиридонов Э.М., Федоров Т.О., Ряховский В.М. Магматические образования Горного Крыма. Статья 2 // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1990. Т. 65. Вып. 6. С. 103—112.
 18. Чернов А.А. Процессы кристаллизации // Современная кристаллография. Т. 3. М.: Наука, 1980. С. 7—232.
 19. Bischoff J.L., Pitzer K.S. Phase relations and adiabats in boiling seafloor geothermal systems // Earth and planetary science letters. 1985. No. 75. P. 327—338.
 20. Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C. SUPCRT 92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0° to 1000°C // Comp. Geosci. 1992. No. 18. P. 899—947.
 21. Sleep N.H. Segregation of magma from a mostly crystalline mush // Geol. Soc. Amer. Bull. 1974. Vol. 85. P. 1225—1232.
 22. Yoder H.S. Albite–Anorthite–Quartz at 5 kb // Carnegie Institution of Washington. Year Booc. 1966—1967. No. 66. P. 477—478.
 23. Yoder H.S., Tilley C.E. Origin of basalt magmas, an experimental study of natural and synthetic rock systems // J. Petrol. 1962. Vol. 3. No. 3. P. 342—532.
1. Grichuk D.V. *Termodinamicheskie modeli submarinnyh gidrotermal'nyh sistem* [Thermodynamic models of submarine hydrothermal systems]. Moscow: Nauchnyj mir, 2000. 304 p. (In Russian).
2. Ivanov I.P. *Thermodynamic modeling of mineral zonality by the example of the Al_2O_3 — SiO_2 — H_2O — HCl system. Essays of physico-chemical petrology*. Moscow: Nauka, 1991. Vol. XVII. P. 36—57. (In Russian).
3. Ivanov I.P., Tkachenko N.A. *Analysis of paragenesis of minerals and modeling of zonality of acid metasomatites. Experimental and theoretical modeling of mineral formation processes*. Moscow: Nauka, 1998. P. 173—188 (In Russian).
4. Kadik A.A., Lukanin O.A., Lapin I.V. *Fiziko-himicheskie usloviya evolyucii bazal'tovyh magm v pripoverhnostnyh ochagah* [Physico-chemical conditions of evolution of basaltic magmas in near-surface foci]. Moscow: Nauka, 1990. 346 p. (In Russian).
5. Kadik A.A., Frenkel' M.Ya. *Termodinamika dekompressii vodosoderzhashchego magmaticheskogo raspлава (na primere sistemy al'bit—voda) i rol' ponizheniya davleniya v mekhanizme magmoobrazovaniya* [Thermodynamics of decompression of a water-containing magmatic melt (on the example of the albite-water system) and the role of pressure reduction in the mechanism of magma formation]. *Geokhimiya*. 1980. Vol. 3. P. 307—334 (In Russian).
6. Kadik A.A., Frenkel' M.Ya. *Dekompressiya porod kory i verhnjej mantii kak mekhanizm obrazovaniya magm*. [Decompression of crustal and upper mantle rocks as a mechanism of magma formation]. Moscow: Nauka, 1982. 120 p. (In Russian).
7. *Igneous rocks. A classification and glossary of terms*. 1989, 251 p. (Russ. ed.: S.V. Efremovoj. *Klassifikaciya magmaticheskikh (izverzhennyh) porod i slovar' terminov*. Moscow: Nedra, 1997. — 248 p.
8. Korneiko A.A., Veselovskiy R.V. New paleomagnetic data of the middle Jurassic igneous complex in the Bodrak river valley, Mountainous Crimea. *Moscow University Geology Bulletin*. 2013. Vol. 68. № 4. 219227p. (In Russian).
9. Korzhinskij D.S. *Teoreticheskie osnovy analiza paragenезисов минералов* [Theoretical foundations of the analysis of mineral paragenesis]. Moscow: Nauka, 1973. 288 p. (In Russian).
10. Korzhinskij D.S. *Teoriya metasomaticheskoy zonal'nosti* [The theory of metasomatic zonality]. 2-nd ed. Moscow: Nauka, 1982. 103 p. (In Russian).
11. Landau L.D., Lifshic E.M. *Teoreticheskaya fizika: Statisticheskaya fizika*. [Fisika teorikoa: fisika Estatistikoa]. Moscow: Nauka, 1964. Vol. 5. 567 p. (In Russian).
12. Zharikov V.A., Rusinov V.L., Marakushev A.A. i dr. *Metasomatizm i metasomaticheskie породы* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Moscow: Nauchnyj mir, 1998. 492 p. (In Russian).

REFERENCES

13. Osipov M.A. *Kontrakciya granitoidov i endogennoe mineraloobrazovanie*. [Granitoid contraction and endogenous mineral formation]. Moscow: Nauka, 1974. 156 p. (In Russian).
14. Persikov E.S. *Vyazkost' magmaticheskikh rasplavov* [Viscosity of magmatic melts]. Moscow: Nauka, 1984. 160 p. (In Russian).
15. Perchuk L.L. *Termodinamicheskij rezhim glubinnogo petrogeneza*. [Petrogenesi sakoneko erregimen termodinamika]. Moscow: Nauka, 1973. 318 p. (In Russian).
16. Redder E. *Fluid inclusions*. 1987, 558 p. [Russ. ed.: D.N. Khitarova. *Flyuidnye vklucheniya v mineralah*. Moscow: Mir, 1987. Vol. 1. 558 p.]
17. Spiridonov E.M., Fedorov T.O., Ryahovskij V.M. Magmatic formations of the Mountainous Crimea. Article 2. *Byull. MOIP. Otd. geol.* 1990. Vol. 65. No. 6. P. 103—112 (In Russian).
18. Chernov A.A. *Crystallization processes. Modern crystallography*. Vol. 3. Moscow: Nauka, 1980. 232 pp. (In Russian).
19. Bischoff J.L., Pitzer K.S. Phase relations and adiabats in boiling seafloor geothermal systems. *Earth and Planetary Science Letters*. 1985. No. 75. P. 327—338.
20. Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C. SUPCRT 92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0 ° to 1000 °C. *Comp. Geosci.* 1992. No. 18. P. 899—947.
21. Sleep N.H. Segregation of magma from a mostly crystalline mush. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1974. Vol. 85. P. 1225—1232.
22. Yoder H.S. Albite—Anorthite—Quartz at 5 kb. *Carnegie Institution of Washington. Year Booc.* 1966—1967. No. 66. P. 477—478.
23. Yoder H.S., Tilley C.E. Origin of basalt magmas, an experimental study of natural and synthetic rock systems. *J. Petrol.* 1962. Vol. 3. No. 3. P. 342—532.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

В.А. Утенков — внес вклад в разработку концепции статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

А.В. Туров — внес вклад в разработку концепции статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Vladimir A. Utenkov — contributed to the development of the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to assume responsibility for all aspects of the work.

Aleksandr V. Turov — contributed to the development of the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to assume responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Утенков Владимир Александрович* — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и геммологии ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия e-mail: vutenk@yandex.ru SPIN-код: 5758-2292 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0132-5547>

Туров Александр Васильевич — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры палеонтологии и региональной геологии ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия e-mail: avturov@yandex.ru SPIN-код: 3461-0455 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2882-0364>

Vladimir A. Utenkov* — Cand. of Sci. (Geol. and Mineral), Assoc. Prof., of the Department Mineralogy and Gemology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia e-mail: vutenk@yandex.ru SPIN-code: 5758-2292 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0132-5547>

Aleksandr V. Turov — Cand. of Sci. (Geol. and Mineral), Assoc. Prof., of the Department paleontology and regional geology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia e-mail: avturov@yandex.ru SPIN-code: 3461-0455 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2882-0364>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author