

Г.А. ВАЛУЙ

Петрологические свидетельства дегазации магматических расплавов в гранитных интрузивах Восточного Сихотэ-Алиня

*Рассмотрено влияние присутствия воды в гранитных расплавах на структуру пород и парагенезисы со-
существующих полевых шпатов в процессе кристаллизации гранитов от ранних до завершающих стадий.
Показано постепенное увеличение количества кварца в гранофировых сростках в зависимости от давления
воды (P_{H_2O}) и от расстояния до контактов и кровли в гранофировых гранитах Араратского и гранодиори-
тах Бринеровского массивов (Дальнегорский район, Приморье), что позволяет в однообразных на первый взгляд
гранофировых породах выделять различные по флюидонасыщенности и глубинности фации. Постепенность
возрастания P_{H_2O} от контактов вглубь интрузива, «зафиксированного» изменением состава гранофиров, сви-
детельствует о диффузионном характере удаления воды из интрузива во вмещающие породы.*

*Ключевые слова: граниты, гранодиориты, гранофиры, микропегматиты, давление флюидов, P_{H_2O} , дегаза-
ция магматических расплавов.*

Petrological evidences of degassing of magmatic melts in granite intrusions of the East Sikhote-Alin.
G.A. VALUI (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

*The paper considers the influence of the water presence in granite melts on the rock structures and parageneses of
the coexisting feldspars in the process of the granite crystallization from the early to closing stages. There is shown the
dependence of the quartz quantity in granophyre and micropegmatite aggregates of the P_{H_2O} and distance to the contacts
and roof in granophyre granites of Ararat sky and granodiorites of Brinerovsky massifs (Dalnegorsky district, Primorye)
that makes it possible to distinguish the facies, diffent in fluid saturation and depth of occurrence, in the monotonous at
first sight granophyre rocks. The gradual increase in P_{H_2O} from contacts deep into the intrusion, which was "fixed" by
changes in the composition of granophyres, indicates the diffusional character of the removal of water from the intrusion
into host rocks.*

*Key words: granites, granodiorites, granophyres, micropegmatites, fluid pressure, P_{H_2O} , degassing of magmatic
melts.*

Введение

Цель статьи – показать возможности детальных петрологических исследований для решения вопроса, как в неизмененных гранитных породах обнаружить следы присутствия воды и других флюидов, покинувших магматический расплав, и как в условиях плохой обнаженности по отдельным фрагментам и обломкам пород решить вопрос о фациальной их принадлежности в однообразных на первый взгляд гранофировых породах.

*ВАЛУЙ Галина Александровна – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: gvalui@mail.ru

Некоторые общие представления о содержании воды в гранитных магмах

Вода – один из основных летучих компонентов магмы. Благодаря своей высокой химической активности вода играет особую роль в процессах образования и дифференциации магматических расплавов, оказывает большое влияние на физические свойства силикатных расплавов и на фазовые равновесия в магматических системах [4–8, 10, 13 и др.].

Вода находится в магмах как в диссоциированной, так и в молекулярной форме. Например, для водно-гранитного расплава в области 300–5000 атм. при $T = 1000$ °С вода полностью диссоциирована, так же как и в базальтовом расплаве при $T = 1200$ °С. В области низких температур при Т-Р условиях солидуса гранита и пегматита доля растворенной воды в диссоциированной форме составляет около 60 %, а в молекулярной – около 40 % от общего ее количества [4, 6]. При небольших содержаниях воды (1–3 масс. %) рассеянная потеря воды магмами кислого, основного и ультраосновного состава происходит в верхних частях континентальной коры на глубинах менее 0,5–10 км, а при концентрации воды 5–10 масс. % – на глубинах менее 10–30 км. Для гранитных интрузивов, которые кристаллизуются на глубинах более 10 км, отделение воды происходит, по-видимому, в основном из остаточных расплавов. Для плутонов, остывающих на глубинах менее 10 км при высокой начальной концентрации воды (около 10 масс. %), возможно кипение на более ранних стадиях остывания до их солидуса. Высокощелочные магмы, обогащенные фтором и хлором, способны удержать большие количества воды вплоть до весьма низких давлений [4]. Экспериментальное изучение водно-альбитовой системы показало, что концентрация воды возрастает к верхним частям столба магмы [4]. В среднем гравитационное распределение воды характеризуется величиной 0,1–0,15 масс. % H_2O на 1 км или 0,4–0,8 масс. % H_2O на 1000 атм. Для слоя расплава мощностью около 10 км гравитационный эффект может привести к различию в концентрации H_2O в его верхних и нижних частях в 1–1,5 масс. %, или 8–10 мол. %. Для магматических тел, мощность которых менее 10 км, например 1–3 км (как у массивов прибрежной зоны Приморья, изучаемых автором [1, 3]), гравитационное распределение летучих компонентов становится достаточно малым и им можно пренебречь.

По современным представлениям кристаллизация гранитов в мезо- и гипабиссальных условиях происходит при $P_{H_2O} < P_{общ.}$ и содержании воды в расплаве 2 ± 1 вес. % [4, 9, 10 и др.]. В отдельных частях интрузивов в процессе кристаллизации происходит скопление воды и других флюидов и возрастание водного давления до величины литостатического, что особенно заметно в приконтактных частях массивов [1].

Проявление диффузии воды в гранитных расплавах

Диффузия воды в магматических расплавах является важнейшим транспортным и динамическим средством, которое определяет особенности магматических процессов: дегазацию магмы, взаимодействие флюидов и магмы, зарождение и рост кристаллов и пузырей в магме и др. [4, 7, 8].

Летучие компоненты легко удаляются из магм при их подъеме, рассеиваясь в окружающей среде без видимых следов. Однако данные экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению флюидного режима, позволяют производить оценку давления воды в магме по ее воздействию на структуру пород и минеральные равновесия [4, 9, 10, 15–17 и др.].

Влияние давления воды на минеральные равновесия

В интрузивах Восточного Сихотэ-Алиня заметного изменения парагенезисов пород в зависимости от давления воды и других флюидов не наблюдается, происходит только изменение составов сосуществующих полевых шпатов [1, 3]. В более глубинных интрузивах

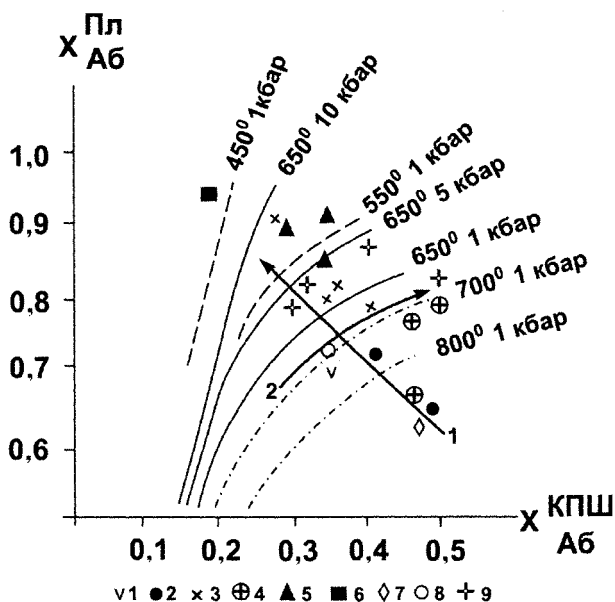


Рис. 1. Распределение натрия между сосуществующими плагиоклазами и КПШ: 1–8 – ассоциация плагиоклаза с антипертитовым КПШ: 1 – в диоритах, 2 – гранодиоритовых включениях, 3 – гранитах центральных частей массивов, 4 – гранитах приконтактовых фаций, 5 – пегматитах и аплитово-пегматитовых дайках, 6 – метасоматически измененных гранитах, 7 – гранодиоритах, 8 – малоглубинных гранитах; 9 – ассоциация внешних зон плагиоклазов с самостоятельными кристаллами КПШ. Штрих-пунктирные линии проведены по данным работы [14], сплошные и пунктирные – по данным работы [16]; линии 1 и 2 – изменение P_{H_2O} в процессе кристаллизации более и менее глубоких интрузивов соответственно

прибрежной зоны Приморья (Владимирском, Ольгинском, Валентиновском) установлено увеличение натриевости (поокисление) плагиоклаза с одновременным возрастанием калиевости (т.е. уменьшением натриевости) КПШ (калишпата) от ранних этапов кристаллизации (ассоциация составов ядер зональных кристаллов плагиоклазов и составов вростков антипертитового КПШ в плагиоклазе) к более поздним (ассоциация краевых кайм плагиоклаза с самостоятельными кристаллами КПШ). Это указывает на то, что при очевидном условии падения температуры в процессе кристаллизации происходит увеличение давления воды (рис. 1, линия 1). В менее глубинном интрузиве (Опричненском) альбитовая составляющая одновременно возрастает в сосуществующих полевых шпатах (рис. 1, линия 2), что свидетельствует об их кристаллизации в условиях синхронно понижающихся температуры и давления флюидов или изменения кислотности–щелочности. Но так как заметного изменения щелочности при кристаллизации гранитов Опричненского массива не происходит (судя по глиноземистости биотита), то вероятнее предположить изменение P_{H_2O} [1, 3].

Влияние давления воды на структуру породы

В глубинных условиях кристаллизация гранитов идет в присутствии флюидов в течение длительного времени, что приводит к образованию крупнозернистых пород равномерно зернистой гранитной структуры, тогда как в малоглубинных условиях происходит быстрая (в геологических масштабах) потеря флюидов из расплава и формируются мелкозернистые породы аплитовой, микропегматитовой или гранофировой структуры. Для двух последних структур характерно широкое распространение в них закономерных кварц-полевых шпатовых (Кв–ПШ) сростаний. Д.С. Штейнберг и Г.Б. Ферштатер [12] установили, что наблюдается понижение содержания кварца в микропегматитовых сростаниях от малоглубинных гранитов к глубинным, это объясняется возрастанием давления водного пара в расплаве. Ими было выделено две группы Кв–ПШ сростаний: одна с содержанием 38–42 % кварца, другая – 28–35 % кварца. Микропегматиты первой группы встречаются в гипабиссальных гранитах, а также в долеритах и диабазах, где образуют участки различной величины и формы. Геологические и петрологические данные убедительно свидетельствуют об их магматической природе. Микропегматиты второй группы наблюдаются как в гипабиссальных, так и в глубинных гранитах. В гипабиссальных гранитах они несут ясные следы развития уже в твердой породе, сопровождаясь зонами гидротермальных изменений. В глубинных гранитоидах микропегматит такого состава отвечает поздним

стадиям кристаллизации. Авторы отмечают, что уменьшение содержания кварца в Кв-ПШ сростаниях совпадает с падением температуры кристаллизации [12]. Состав первично магматического микропегматита $Kv_{40}(Or_{55}Ab_{40}An_{5})_{60}$ соответствует (Кв-Аб-Ор) котектике при P_{H_2O} около 500 бар и $T = 780$ °С. Эти параметры отвечают условиям гипабиссальной фации. В графических зонах пегматитов, ассоциирующих с более глубинными гранитами, содержание кварца в сростаниях падает до 34–35 %. Такое содержание соответствует (Кв-Аб-Ор) котектике при $P_{H_2O} = 1500$ бар и $T = 700$ °С и отражает повышающееся давление водяного пара в остаточном расплаве, всегда насыщенном летучими компонентами. На основании данных экспериментальных работ [14, 15] Г.Б. Ферштатер построил диаграмму, на которой показана зависимость содержания кварца в котектике Кв-Аб-Ор от давления водяного пара [11].

Таким образом, появилась возможность оценивать P_{H_2O} при образовании пород гранофировой и микропегматитовой структуры, которые наиболее близко отвечают упрощенной экспериментальной системе (Кв-Аб-Ор), определяя количество кварца в закономерных сростаниях с каликатровым полевым шпатом. Такой анализ сделан автором для гранофировых гранитов Араратского и гранодиоритов гранофировой структуры Бринсровского массивов (Дальнегорский район, Приморье).

Гранофировые граниты Араратского массива

Араратский гранитный массив занимает центральную часть Дальнегорской вулcano-тектонической структуры [1, 2]. Его основная часть сложена гранофировыми гранитами (рис. 2). Детальное изучение показало, что количество кварца в гранофировых сростках вблизи контактов с вмещающими породами, а также вблизи кровли (на наиболее высоких гипсометрических уровнях – вершинах сопков) составляет 46–48 об. %, что отвечает $P_{H_2O} = 0,1–0,2$ кбар, но с удалением от контакта и кровли оно падает до 42–44 об. %, а давление воды возрастает до 0,3–0,4 кбар согласно диаграмме [11] (табл. 1). Полученные результаты в виде вероятных изолиний равного давления воды нанесены на карту интрузива (рис. 2). Для северной части массива устанавливается четкая зависимость распределения изолиний парциального давления воды от рельефа: все образцы, отобранные вблизи контактов (точки 10, 11) и в местах с абсолютной отметкой выше 250 м (видимо, недалеко от кровли массива), имеют $P_{H_2O} < 0,2$ кбар, а ниже 250 м – $P_{H_2O} \geq 0,3$ кбар. Серия образцов по линии маршрута от высоты с отметкой 800 м до уреза ключа с отметкой 200 м над ур. м. показывает постепенное возрастание P_{H_2O} от 0,1 до 0,3 кбар. Таким образом, разница высот в 600 м соответствует возрастанию P_{H_2O} на 0,2 кбар (от 0,1 до 0,3 кбар). Наиболее глубокие части интрузива вскрыты в нижнем течении кл. Каменистый и в левом борту кл. Довгалевская Падь (рис. 2, точки 4, 6–9). Распределение изолиний P_{H_2O} ясно показывает, что северная и южная части интрузива, разделенные долиной Довгалевской Пади, являются единым интрузивом. В южной части массива распределение изолиний P_{H_2O} более сложное, чем в северной. Так, в юго-западном выступе наблюдаются наибольшие P_{H_2O} (до 0,4 кбар), что свидетельствует, видимо, о более мощной крышке над этой частью интрузива в момент кристаллизации. Более высокое флюидное давление в этой части массива подтверждается и более мощным ореолом контактово-измененных пород по сравнению с северо-восточным контактом (рис. 2). Величина P_{H_2O} в кровле интрузива показывает, что его кристаллизация происходила на глубине не более 300–400 м от палеоповерхности. Наличие миароловых пустот свидетельствует о выделении флюидов во вмещающие породы и близости $P_{общ}$ и $P_{фл.}$ Упорядоченность полевых шпатов хорошо коррелирует с содержанием кварца в графических сростках, что естественно, так как то и другое определяется прежде всего флюидным давлением. В краевых зонах массива, где $P_{H_2O} = 0,1–0,2$ кбар, индекс упорядоченности (ИУ) плагиоклазов составляет 0–40, а КПШ представлены высокими ортоклазами с $2V_{Np} = 44–66^\circ$ и ИУ = 0,20–0,40. В участках, где флюидное давление

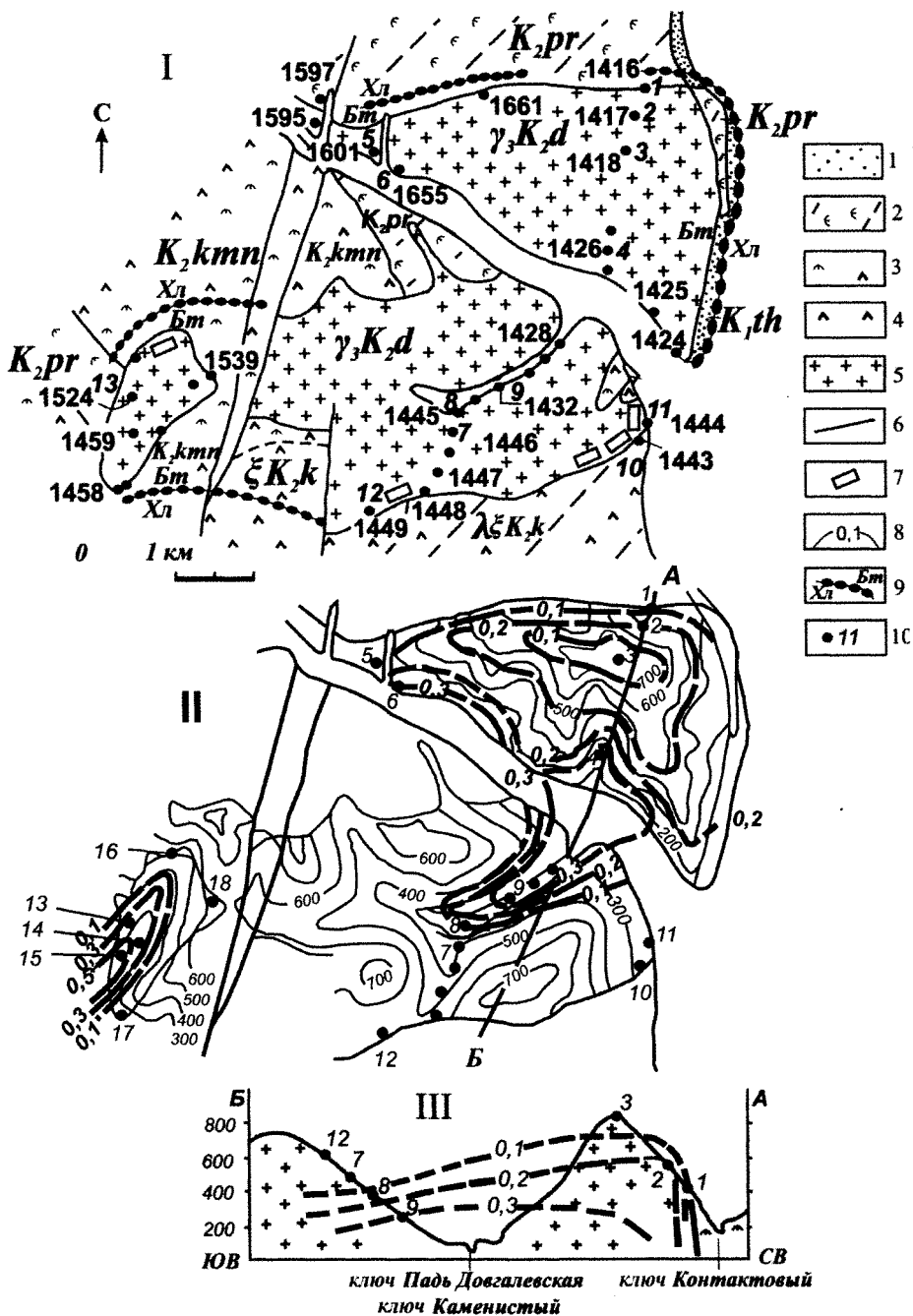


Рис. 2. Араратский интрузив. I – схематическая геологическая карта: 1 – песчаники с прослоями алевро-аргиллитов таухинской свиты нижнего мела, 2 – игнимбриты и туфы риолитов приморской серии верхнего мела, 3 – туфы и спекшиеся туфы риодацитов каменской толщи верхнего мела, 4 – дациты каменского вулканического комплекса верхнего мела, 5 – гранофировые граниты, 6 – тектонические нарушения, 7 – участки директивных текстур в гранитах, 8 – изолинии P_{H_2O} , 9 – граница смены биотит-мусковитовой ассоциации хлорит-мусковитовой в контактовоизмененных породах, 10 – места отбора образцов (цифры соответствуют порядковым номерам в табл. 1); II – контуры интрузива с горизонталями и предполагаемыми изолиниями P_{H_2O} ; III – разрез интрузива по линии АБ [1, 2]

Зависимость состава Кв-КПШ графических сростков и P_{H_2O} от гипсометрического уровня отбора образцов (среза интрузива). Араратский массив

№ п/п	Образец	Содержание Кв в сростках, об. %		P_{H_2O} кбар	Положение образца над уровнем моря
Северная часть интрузива					
1	В-1416	47,0	(8)	0,1	400
2	В-1417	45,0	(6)	0,2–0,3	500
3	В-1418	46,0	(6)	0,15	800
4	В-1426	44,0	(5)	0,2–0,3	250–300
5	В-1601	46,0	(5)	0,15	250–300
6	В-1655	44,0	(6)	0,2–0,3	200–250
Юго-восточная часть интрузива					
7	В-1446	47,0	(6)	0,1	450
8	В-1445	47,0	(5)	0,1	400
9	В-1432	44,0	(6)	0,2–0,3	250
10	В-1443а	48,0	(5)	0,1	250
11	В-1444	47,0	(4)	0,1	250
12	В-1449	48,0	(6)	0,1	600
Юго-западная часть интрузива					
13	В-1524	45,0	(8)	0,2–0,3	350
14	В-1523	44,0	(6)	0,2–0,3	280
15	В-1459в	42,0	(6)	0,3–0,4	220–250
16	В-1459г	46,0	(6)	0,15	400
17	В-1459д	46,0	(6)	0,15	250
18	В-1539	46,0	(8)	0,15	600–650

Примечание: Числа в скобках – количество замеров. Порядковые номера соответствуют таковым на рис. 2.

повышается до 0,3–0,4 кбар (в юго-западной части интрузива), $2V_{Np}$ КПШ увеличивается до 64–70°, ИУ – до 0,60, а ИУ плагиоклазов – до 60–70.

Таким образом, изучение состава графических сростков и упорядоченности полевых шпатов позволяет в однообразных на первый взгляд гранофировых гранитах выделять различные по глубинности и флюидонасыщенности фации. В данном случае для Араратского массива можно выделить две фации: 1 – приконтактовую – прикровлеую с P_{H_2O} не более 0,15 кбар и мало упорядоченными полевыми шпатами (КПШ с ИУ = 0,2–0,4 и плагиоклазами с ИУ = 0–30); 2 – более глубинную с $P_{H_2O} > 0,2–0,3$ кбар, которая обнажается в наиболее эродированных частях интрузива и содержит более упорядоченные полевые шпаты (КПШ с ИУ > 0,5 и плагиоклаз с ИУ = 60–100).

Гранофировые гранодиориты и граниты Бринеровского массива

Бринеровский интрузив расположен на берегу Японского моря к югу от устья р. Рудная (Тегюхе) и мыса Бринера. Обнажаясь в морских обрывах и бортовых скалах ключей Быстрый и Безымянный, он простирается на 3,5 км, почти до мыса Черная Скала. Массив представляет собой многофазное лакколитообразное тело, сложенное диоритами и кварцевыми диоритами (56 масс. % SiO_2), гранодиоритами (63–66 масс. % SiO_2),

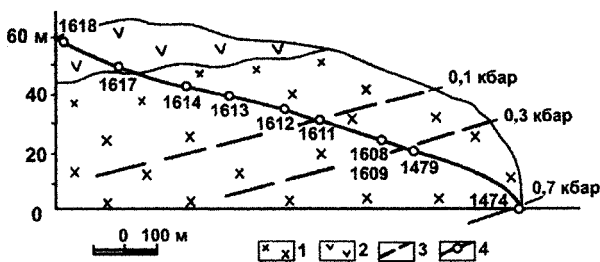


Рис. 3. Схематический разрез Бринеровского интрузива вдоль русла кл. Быстрый. 1 — гранодиориты, 2 — вмещающие эффузивы, 3 — изогипсы P_{H_2O} согласно составу гранофиров, 4 — места отбора образцов

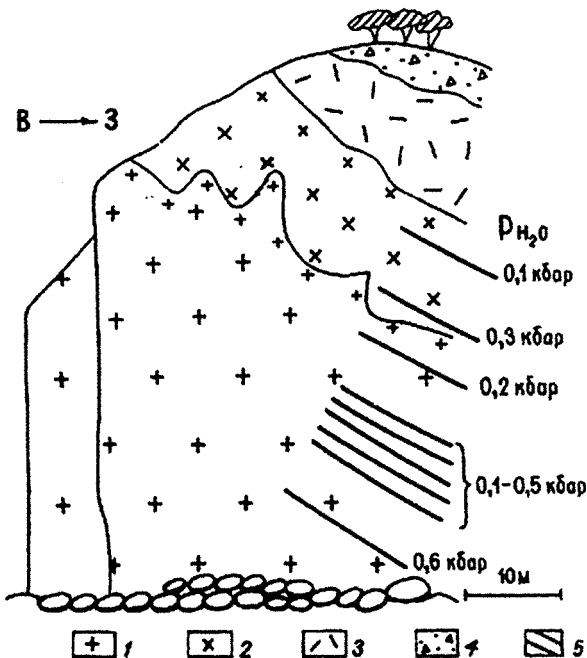


Рис. 4. Вертикальный разрез прикровлевой части Бринеровского массива по одной из расщелин перпендикулярно линии берега моря: 1 — турмалиновые граниты, 2 — гранофировые гранодиориты, 3 — риолит-дациты кровли, 4 — делювий, 5 — изогипсы P_{H_2O} согласно составу гранофиров. Серия частых линий 0,1–0,5 кбар — зона ритмичного гранофир-аплитового расчленения в турмалиновых гранитах [1]

и турмалиновыми гранитами (72–74 масс. % SiO_2). Интрузив полого погружается в сторону континента под вулканогенные породы, которые он прорывает и ороговиковывает [1, 2].

Большая часть площади Бринеровского интрузива сложена очень неоднородными гранодиоритами, которые содержат крупные (2–3 × 30 м) блоки (останцы ранней фазы?) и округлые мелкие (0,2–0,5 м) включения (автолиты) мелкозернистых кварцево-диоритовых или диоритовых пород. В центральной части массива гранодиориты представлены слабо порфировидными средне- и крупнозернистыми породами массивной текстуры. В приконтактных и прикровлевых частях гранодиориты сменяются резко порфировидными разновидностями с мелкозернистой основной массой, содержащей участки микропегматитовых и гранофировых структур. По мере приближения к контактам и кровле количество участков гранофировых структур постепенно увеличивается до полного преобладания их в основной массе, а сами гранофиры становятся все более тонкозернистыми (рис. 3, точки 1617, 1618). Необходимо отметить, что гранодиориты с основной массой преобладающе гранофировой структуры имеют розовато-сиреневый оттенок, в отличие от серых гранодиоритов с основной массой равномерно зернистой структуры. Количество кварца в гранофировых сростках гранодиоритов находится в строгой зависимости от их расстояния до контактов и кровли. В непосредственной близости от контактов и кровли графические сростки содержат 47–49 об. % кварца, что отвечает $P_{общ.} > P_{H_2O} = 0,1$ кбар, соответствуя расстоянию около 300 м от палеоповерхности (обр. В-1618, В-1612, В-1611; табл. 2). При увеличении глубины вреза кл. Быстрый, пересекающего интрузив насквозь от 60-метровой до нулевой горизонтали (устье ключа), т.е. с удалением от кровли массива, количество кварца в гранофировых сростках гранодиоритов уменьшается до 38–40 об. %, что соответствует возрастанию P_{H_2O} до 0,5–0,7 кбар при условии постоянной щелочности и низком содержании фтора в расплаве (рис. 3, точка 1474).

Гранодиориты в северо-восточной части массива прорваны турмалиновыми гранитами гранофировой структуры, которая позволяет определить величину P_{H_2O} при их

**Содержание кварца в гранофировых сростках и флюидное давление
в породах Бринеровского массива**

Образец	Порода	Место взятия образца	Содержание кварца в Кв-КПШ сростках, об. %	P_{H_2O}
В-1474	Гранодиорит	Скалы на берегу моря (300–400 м от кровли)	38	0,7
В-1475В	- « -	То же, 100–200 м	40	0,5
В-1475Ж	- « -	Вблизи контакта	44	0,2
В-1479	- « -	150 м от контакта с эффузивами	42	0,3
В-16056	- « -	Глыба на берегу моря	42	0,3
В-1606е	- « -	- « -	45	0,2
В-1609	- « -	200–300 м от контакта	42	0,3
В-1611	- « -	Вблизи контакта	48	0,1
В-1612	- « -	- « -	47	0,1
В-1618	- « -	Западный контакт	48	0,1
А-298	- « -	Кровля	47	0,1
А-303	- « -	- « -	49	0,1
В-1477а	Гранит	Контакт с эффузивами	45	0,2
В-1475	- « -	70–80 м от контакта	42	0,3

кристаллизации. Распределение изолиний P_{H_2O} в них имеет более сложный характер (рис. 4). В непосредственной близости от контакта P_{H_2O} в гранитах – около 0,2 кбар, а на некотором удалении от контакта с гранодиоритами в гранитах наблюдается зона ритмичного аплит-гранофирового расслоения, которая обусловлена возникновением механизма двойной диффузионной конвекции («d–d» эффекта), обнаруженного автором и описанного ранее [1, 2].

Заключение

Итак, определение количества кварца в графических сростках дает возможность оценить величину флюидного давления при кристаллизации пород гранофировой структуры (при условии постоянной щелочности и невысоких содержаний фтора) и глубину их образования, которое происходит, как было показано для Араратского и Бринеровского массивов, на глубине не менее 300 м от палеоповерхности при постепенном возрастании P_{H_2O} от кровли вглубь интрузива. Постепенное падение флюидного давления к контактам магматических тел свидетельствует о диффузионном характере удаления воды и других флюидов в процессе кристаллизации гранитных интрузивов Восточного Сихотэ-Алиня.

Таким образом, детальные петрографические исследования позволяют в однообразных на первый взгляд гранофировых породах выделять различные по глубинности и флюидонасыщенности фации, что в условиях плохой обнаженности по отдельным фрагментам пород делает возможным уточнять расстояние от кровли и контактов и форму геологических тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валуи Г.А. Петрология гранитоидов и дифференциация расплавов в малоглубинных условиях (Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс. Владивосток: Дальнаука, 2014. 245 с.
2. Валуи Г.А., Стрижкова А.А. Петрология малоглубинных гранитоидов на примере Дальнегорского района, Приморье. Владивосток: Дальнаука, 1997. 199 с.
3. Валуи Г.А. Полевые шпаты и условия кристаллизации гранитоидов. М.: Наука, 1979. 146 с.
4. Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И. Вода в магматических расплавах. М.: Наука, 1971. 265 с.
5. Кеянеди Дж. О роли воды в магме // Земная кора. М.: ИЛ, 1957. С. 505–519.

6. Персиков Э.С. Вязкость магматических расплавов. М.: Наука, 1984. 159 с.
7. Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Некрасов А.Н. Диффузия воды в расплавах андезита и базальта при высоких давлениях // Геохимия. 2010. № 3. С. 227–239.
8. Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Некрасов А.Н., Бондаренко Г.В. Концентрационная зависимость диффузии воды в расплавах обсидиана и дацита при высоких давлениях // Геохимия. 2014. № 5. С. 406–423.
9. Перчук Л.Л. Термодинамический режим глубинного петрогенеза. М.: Наука, 1973. 318 с.
10. Рябчиков И.Д. Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М.: Наука, 1975. 133 с.
11. Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С. Петрология магматических гранитоидов (на примере Урала). М.: Наука, 1975. 286 с.
12. Штейнберг Д.С., Ферштатер Г.Б. Об особенностях химического состава гранитов вулканических и плутонических ассоциаций // Докл. АН СССР. 1968. Т. 182, № 4. С. 918–921.
13. Burnham C.W. Development of the Burnham model for prediction of the H₂O solubility in magmas // Reviews in Mineralogy. 1994. Vol. 30. P. 123–129.
14. Iiyama J.T. Contribution a l' etude des equilibres sub-solidus du systeme ternaire orthose-albite-anortite a l'aide des reactions d'echange d'ions Na-K au contact d'une solution hydrothermal // Bull. Soc. franc. mineral. et Cristallogr. 1966. Vol. 89, N 4. P. 442–454.
15. Luth W.C., Jahns R.H., Tuttle O.F. The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars // J. Geophys. Res. 1964. Vol. 69. P. 759–773.
16. Seck H.F. Der Einfluss des Drucks auf die Zusammensetzung Koexistierender Alkalifeldspate und Plagioclase in System NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-CaAl₂Si₂O₈-H₂O // Contrib. Mineral. and Petrol. 1971. Vol. 31. P. 67–86.
17. Tuttle O.F., Bowen N.L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O // Geol. Soc. Amer. Mem. 1958. Vol. 74. P. 1–153.