

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ
**ГЕНЕЗИС УЛЬТРАКАЛИЕВЫХ КВАРЦЕВЫХ ПОРФИРОВ
НА СЕВЕРЕ АРАБО-НУБИЙСКОГО ЩИТА**

Б.А. Литвиновский^{1,2}, Н.С. Карманов¹, Е. Вапник²

¹ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия

² Dept. of Geological and Environmental Sciences, Ben-Gurion University of Negev, P.O. Box 653, Beer-Sheva 84105, Israel

Ультракалиевые кварцевые порфиры (УККП) с содержанием $K_2O = 6,5\text{—}10$, а $Na_2O = 0,1\text{—}2,5$ мас. % наблюдаются на юге Израиля и на Синайском п-ове (Египет) в бимодальной дайковой свите, образованной на заключительном этапе Пан-Африканского орогенеза. В составе свиты преобладают кварцевые порфиры с $K_2O = 4\text{—}5,5$ мас. %; доля мафических пород составляет $< 5\%$ объема свиты. УККП образуют либо редкие дайки, либо участки в дайках кварцевых порфиров. Они имеют магматическую структуру с преобладанием микрогранофирового и сферолитового матрикса. Минералогические свидетельства привноса калия на постмагматической стадии отсутствуют. Признаки низкотемпературной адуляризации, характерной для ультракалиевых риолитов ряда районов мира, не выявлены. Фенокристаллы щелочного полевого шпата в УККП и в кварцевых порфирах имеют одинаково высокие содержания ортоклазовой молекулы ($\geq 85\text{—}90\%$). По данным изучения расплавных включений, магмы, из которых кристаллизовались фенокристаллы кварца как в УККП, так и в ординарных кварцевых порфирах, имели состав кварцевого порфира и содержали $2\text{—}3$ мас. % H_2O , до $\sim 1\%$ F и $0,1\text{—}0,15\%$ Cl. Исследованиями на сканирующем электронном микроскопе установлено, что во многих дайках ординарных кварцевых порфиров матрикс гетерогенный. Около 50% составляют округлые и овальные обособления ($0,3\text{—}15$ мм в диаметре) с микрогранофировой и сферолитовой структурами. Обособления существенно обогащены калием и по составу не отличаются от типичных УККП. В межсферолитовом микрокристаллическом агрегате преобладает натрий.

Предложена модель формирования УККП в условиях неравновесной кристаллизации кислой магмы, движущейся по трещинам в холодных вмещающих породах. Внедрявшаяся магма по составу отвечала кварцевому порфиру и содержала $5\text{—}7\%$ фенокристаллов. На ранних стадиях кристаллизации матрикса формировались сферолиты и микрогранофировые обособления, обогащенные калием, подобно тому, как это наблюдается при кристаллизации в гаплогранитной системе. Поскольку система оставалась закрытой для петрогенных компонентов, в остающемся расплаве возрастала доля Na, а неравновесные условия кристаллизации препятствовали выравниванию составов ранних и поздних фаз. В процессе перемещения „магматической каши“ на некоторых участках создавались благоприятные условия для частичной сепарации остаточного расплава и твердой фазы. Вероятными механизмами сепарации могли быть фильтр-прессинг, пристеночная кристаллизация либо разделение жидкой и твердой фаз после достижения так называемого порога жесткого просачивания. УККП представляют собой продукты кристаллизации смеси, состоящей в основном из ранних микрокристаллических обособлений и небольшого количества остаточного расплава.

Ультракалиевые риолиты, бимодальная свита, дайки кварцевых порфиров, неравновесная кристаллизация.

**GENESIS OF ULTRAPOTASSIC QUARTZ PORPHYRY
IN THE NORTHERN ARABIAN-NUBIAN SHIELD**

B.A. Litvinovsky, N.S. Karmanov, and E. Vapnik

In southern Israel and on the Sinai Peninsula, ultrapotassic quartz porphyries (UPQP) with $6.5\text{—}10$ wt. % K_2O and $0.1\text{—}2.5$ wt. % Na_2O were found in a bimodal dike suite that formed at the final stage of the Pan-African orogeny. The suite is made up mainly of quartz porphyry ($4\text{—}5.5$ wt. % K_2O); mafic rocks amount to $\sim 5\%$. The UPQP form rare dikes or patches in quartz porphyry dikes. These are typical igneous rocks with microgranophytic and spherulitic matrices. There is no mineralogical evidence for the gain of K at the postmagmatic stage. Evidence for low-temperature adularization found in some ultrapotassic rhyolites from other world areas has not been revealed either. Alkali-feldspar phenocrysts in the UPQP and quartz porphyries have high contents of orthoclase ($\geq 85\text{—}90\%$). Study of melt inclusions in quartz phenocrysts in both the UPQP and ordinary quartz porphyries showed that the phenocrysts crystallized from magmas of quartz porphyry composition that contained $2\text{—}3$ wt. % H_2O , up to $\sim 1\%$ F, and $0.1\text{—}0.15\%$ Cl. Scanning electron microscope studies showed that many alkali quartz

porphyry dikes have a heterogeneous matrix. Rounded and oval segregations (0.3–15 mm across) with microgranophyric and spherulitic textures amount to ~50%. They are enriched in K_2O and are compositionally similar to typical UPQP. In the microcrystalline aggregates hosting these segregations Na dominates over K.

To account for the UPQP generation, a model is proposed for the disequilibrium crystallization of silicic magma during its flow along fractures in cooled country rocks. The magma was of alkali rhyolite composition and contained 5–7% phenocrysts. At the early stages of the matrix crystallization, spherulitic and microgranophyric segregations formed. They were enriched in K, which is typical of a haplogranite system at the beginning of crystallization. Since the system remained closed for major components, the portion of Na in the residual melt increased. The disequilibrium crystallization conditions inhibited a chemical interaction between early and late phases. During the “magma mash” movement, partial separation of the solid and residual liquid phases might have occurred. The likely separation processes were filter pressing, side-wall crystallization, and separation of the liquid and solid phases above the “rigid percolation threshold”. The UPQP resulted from the crystallization of a mixture of early microcrystalline segregations and minor residual melt.

Ultrapotassic rhyolite, bimodal suite, quartz porphyry dikes, disequilibrium crystallization

ВВЕДЕНИЕ

Риолиты с необычно высоким (до 10—11 мас.%) содержанием K_2O не имеют широкого распространения, однако известны во многих районах мира в лавовых и туфовых толщах либо в малоглубинных дайках [1—10]. Этот тип пород относится разными авторами к калиевым [11] или ультракалиевым риолитам [2]. Он не включен в классификацию магматических пород Международного союза геологических наук (IUGS), а выделенные в классификации высококалиевые известково-щелочные риолиты значительно беднее калием [12]. Поэтому авторы полагают, что термины „калиевый“ или „высококалиевый“ в данном случае вряд ли приемлемы; эти породы целесообразно называть, вслед за Е.Д. Фромбергом [2], ультракалиевыми риолитами. Анализ литературы показывает, что максимальные содержания K_2O в ультракалиевых риолитах достигают 11 мас.%, а концентрация Na_2O опускается до 0,1 %, однако нижняя граница по калию и ограничения по величине K_2O/Na_2O остаются неопределенными. Это вызывает затруднения при дискриминации, поскольку ультракалиевые риолиты обычно тесно связаны в пространстве и во времени с богатыми щелочами калиевыми риолитами (alkaline rhyolite), в которых нередко содержание $K_2O \geq 5$ мас.%. Мы предлагаем определить нижнюю границу содержания калия (мас.%) в ультракалиевых риолитах величиной $K_2O/Na_2O > 2$ в породе, как это было сделано С.Ф. Фолей с соавторами [13] для ультракалиевых мафических пород. Такое соотношение, как следует из наших и опубликованных материалов, дает наиболее низкое значение содержания K_2O в этих породах на уровне ~7 мас.% (при пересчете на безводный остаток).

Специфический химический состав ультракалиевых риолитов обусловил появление разнообразных гипотез их образования, значительная часть которых рассмотрена в обзорной статье Д. Стюарта [11]. Он показал, что, несмотря на дайковую или экструзивную природу и типичные магматические структуры обсуждаемых пород, их образование не может быть объяснено на основе существующих магматических моделей. Такой вывод остается в силе и в том случае, если предположить участие в магматическом процессе флюидов с различными соотношениями воды, галогенов, углекислоты и хлоридов щелочей. Экспериментальные исследования, проведенные в последние 20—30 лет, уже после публикации упомянутого выше обзора не дают оснований для других выводов. Более того, не нашла подтверждения отмечавшаяся раньше тенденция к существенному обогащению альбит-ортоклазовой котектики калием в маловодной гаплогранитной системе [14]. Новые эксперименты позволили установить, что, хотя в этих условиях котектический расплав действительно более богат ортоклазом по сравнению с водонасыщенной системой, соотношение альбитовой и ортоклазовой молекул остается близким к единице в широком интервале давлений [15].

Несмотря на отсутствие экспериментальных обоснований, некоторые исследователи продолжают отстаивать магматическую природу ультракалиевых риолитов, привлекая модель флюидно-магматического взаимодействия. При этом предполагается резкое обогащение сосуществующих с магмой флюидов ионами K^+ , H^+ и F^- [1, 2, 10, 16]. Высказано также предположение о накоплении и взрывной потере Na^+ в апикальных частях магматической камеры [17]. Перечисленные модели остаются в ранге гипотез и нуждаются в убедительном подтверждении, так же как гипотезы, опирающиеся на некоторые черты сходства ультракалиевых риолитов с обогащенными калием лунными гранитами, например, гипотеза поздней магматической ликвации [18] или гипотеза импактного анатексиса [19].

В связи с тем, что существующие магматические модели образования ультракалиевых риолитов не согласуются с данными об особенностях химического состава этих пород, многие исследователи отдают предпочтение моделям, основанным на признании ведущей роли метасоматических процессов в накоплении калия [4, 5, 11]. Наиболее популярна модель низкотемпературной адуляризации [9, 20—26].

Некоторые авторы полагают, что источником калия были рассолы, которые просачивались сверху из закрытых морских бассейнов [9, 22].

Ультракалиевые риолиты описаны во многих районах на севере Арабо-Нубийского щита, в частности, на Синайском полуострове в Египте [27], в Иордании [5], на юге Израиля [3, 28, 29]. Их образование традиционно объясняется метасоматической переработкой щелочно-полевошпатовых риолитов, широко распространенных в неопротерозойских вулканических толщах и дайковых роях [3, 5].

В статье обсуждаются условия образования ультракалиевых риолитов юга Израиля, которые входят в состав бимодальной дайковой свиты, образованной на заключительном этапе Пан-Африканского орогенеза. Опираясь на новые данные, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа и при изучении расплавных включений в фенокристаллах кварца, авторы обосновывают магматическое происхождение ультракалиевых пород. Предложена модель неравновесной кристаллизации риолитовой магмы с последующей сепарацией обогащенного калием микрокристаллического агрегата и остаточного расплава.

КРАТКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Исследование даек проводилось в Эйлатском районе — наиболее крупном на юге Израиля выступе докембрийского фундамента (рис. 1). Этот район, а также близлежащие блоки Амрам, Тимна и выходы докембрийских пород на прилегающей территории Иордании образуют самые северные обнажения Арабо-Нубийского щита (см. рис. 1, врезка). Многочисленные дайковые рои поздней стадии Пан-Африканского орогенеза формировались в течение довольно продолжительного времени (не менее 70 млн лет), примерно от 600 до 530 млн лет назад; их образование связано с фундаментальной сменой геодинамического режима — от преобладающего сжатия к преобладающему растяжению [27, 30—32]. Обычно дайки сконцентрированы в пределах полос шириной 20—40 км, которые прослеживаются с перерывами на сотни километров. Состав слагающих их пород варьирует от базальтового и андезитового до риолитового.

В Эйлатском районе нами выделены четыре последовательных эпизода дайкообразования. Бимодальная свита, в которой обнаружены ультракалиевые кислые породы, была сформирована в течение третьего эпизода. Дайки этой свиты распространены наиболее широко по сравнению с дайками остальных трех эпизодов [33]. В составе бимодальной свиты кислые породы (кварцевые порфиры с подчиненным количеством полевошпатовых риолит-порфиров) существенно преобладают над базитовыми разновидностями. На долю долеритов и трахиандезитов приходится менее 5 % объема. Обычно они слагают краевые зоны композитных даек, которые немногочисленны, но характерны для бимодальной свиты. Индивидуальные базитовые дайки редки.

Дайки кислого состава распространены в пределах изученной площади более или менее равномерно (см. рис. 1), но в районе горы Шломо на участке $1,5 \times 2$ км дайки кварцевых порфиров слагают от 60 до 90 % общего объема пород [34]. Простираание даек в южной половине района в основном субмеридиональное; к северу оно постепенно сменяется на северо-восточное; на отдельных участках (например, район вад

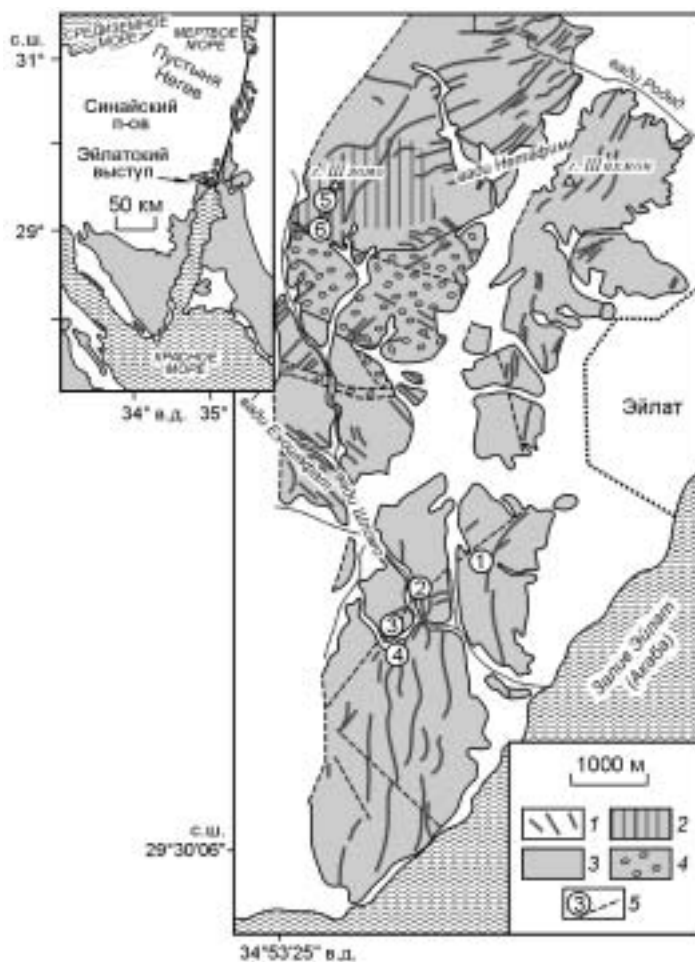


Рис. 1. Распределение риолитовых даек бимодальной свиты в Эйлатском районе, Южный Израиль.

Схема составлена на основе дешифрирования аэрофотоснимков, проведенного В. Вознесенским, с добавлениями и уточнениями авторов. 1 — дайки кварца, риолит-порфиров; 2 — участок с плотностью даек 50—80 %, по [34]; 3 — выступы докембрийского фундамента; 4 — эйлатские конгломераты; 5 — дайка ультракалиевых кварцевых порфиров и ее номер.