

УДК 552 (552.313 (.8))

Д.В. Попов<sup>1</sup>, Н.А. Некрылов<sup>2</sup>, П.Ю. Плечов<sup>3</sup>

## ПЕТРОЛОГИЯ ВЕРХНЕАЛЬБСКИХ ТУФФИТОВ В РАЙОНЕ БАХЧИСАРАЯ (ЮГО-ЗАПАДНЫЙ КРЫМ)<sup>4</sup>

Впервые получены данные о составе расплавных включений в плагиоклазе и кварце из туффитов в районе Бахчисарая, детально изучен минеральный состав этих пород и первично-магматическая зональность плагиоклаза из них. Магматические расплавы имеют риолитовый состав и попадают в область высококалийных серий нормальной щелочности. Измеренное в расплавных включениях содержание воды достигает 4 масс.%. Кристаллизация минералов вкрапленников происходила при температуре 820–860 °С и давлении не менее 0,1 ГПа. Туффиты Бахчисарая сформировались в результате вулканизма в условиях активной континентальной окраины.

*Ключевые слова:* раннемеловой магматизм, туфы, расплавные включения в плагиоклазе и кварце, Крым, Бахчисарай.

We present first data on the composition of melt inclusions in plagioclase and quartz crustal clasts and detailed study of plagioclase chemical zoning and mineral compositions from Bakhchysarai Late Albian tuffites. All magmatic melt compositions fall into field of high-K rhyolites. Measured water content in melt inclusions is up to 4 wt.%. Phenocrysts crystallized at the temperature within range 820–860 °C and pressure not less than 1 kbar. Bakhchysarai tuffites were formed in active continental margin geotectonical settings.

*Key words:* Lower Cretaceous magmatism, tuff, melt inclusions in plagioclase and quartz, Crimea, Bakhchysarai.

**Введение.** В пределах Крыма широко распространены меловые туфогенные отложения, петролого-геохимическое исследование которых имеет ключевое значение при определении характера вулканизма — индикатора палеогеодинамической обстановки. Наиболее мощные и сохранные в отношении первичных минералов отложения относятся к верхнему альбу [Лебединский, Макаров, 1962; Барабошкин, 1997; Копаевич, Хотылев, 2014]. Они описаны в обнажениях в районе Балаклавы (мощность 30–110 м), на г. Кубалач (30 м) и в районе Бахчисарая (в долине р. Кача и на склонах г. Сель-Бухра; мощность ~1,5 м). Альбские и коньяк-туронские лавы андезитового состава, туфы и туффиты мощностью до ~1 км вскрыты в скважинах в северо-западной части Крыма (тарханкутская свита) (рис. 1) [Гнідец и др., 2010].

По данным бурения и магнитной съемки на территории Крыма выделено 13 альбских палеовулканических центров (рис. 1) [там же], 11 из них находятся в северо-западной части полуострова, их продуктами являются вулканы тарханкутской свиты. Деятельность этих центров связывают с раскрытием задугового (?) бассейна — Каркинит-

ского грабена — в раннемеловое время [Никишин и др., 2013]. Еще один палеовулканический центр находится в пределах Ломоносовского поднятия, западнее южной оконечности п-ова Крым, это наиболее вероятный источник пирокластического материала туффитов в районе Балаклавы, для которых установлена связь с надсубдукционным магматизмом [Никишин и др., 2013; Плечов, Попов, 2014], предположительно в условиях активной континентальной окраины [Плечов, Попов, 2014]. Выделение позднеальбского палеовулканического центра юго-восточнее п-ова Крым при наличии в этой области только редких прослоев туфоаргиллитов [Гнідец и др., 2010] выглядит сомнительным.

Источник вулканогенного материала туффитов г. Кубалач не установлен, вероятно, он находился южнее современной береговой линии [Лебединский, Макаров, 1962]. В отношении туфогенной толщи в районе Бахчисарая также нет однозначности — в качестве источника вулканогенного материала рассматривают палеовулканические центры Балаклавы или Каркинитского грабена [Никишин и др., 2013].

Цель работы — определение источника и геодинамической обстановки формирования пи-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, магистрант; *e-mail:* d.vs.porov@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, мл. науч. с., аспирант; *e-mail:* nekrilov.n@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, профессор; *e-mail:* pplechov@gmail.com

<sup>4</sup> Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

рокладического материала туффитов в районе Бахчисарая. В ходе полевых работ летом 2013 г. нами опробованы эти породы в двух точках (рис. 1): в русле р. Кача (образец PDV|Cr-13-55/A, далее Кача-55, координаты отбора N 44,699°, E 033,954°) и на склоне г. Сель-Бухра (образец PDV|Cr-13-49/B, далее Сель-Бухра-49, координаты отбора N 44,748°, E 033,992°). Нами изучены петрография этих пород, состав и зональность плагиоклаза и роговой обманки в них, а также первичные расплавные включения в кристаллокластах кварца и плагиоклаза.

**Методы исследований.**

**Экспериментальные методы.**

С отобранными из образцов зернами плагиоклаза и кварца с первичными расплавными включениями выполнены две серии термических закалочных экспериментов — с визуальным контролем и без него. Критерии первичности расплавных включений, методы проведения эксперимента и интерпретации результатов подробно изложены в [Плечов, 2014].

Оценка температуры гомогенизации расплавных включений по последнему кристаллу выполнена на основе термометрических экспериментов с визуальным контролем в микротермокамере «Linkam-1500». Эксперименты проводились в атмосфере высокочистого гелия. Температура нагрева контролировалась с помощью Pt–PtRh<sub>10</sub>-термопары, калиброванной по точке плавления серебра (962 °C).

Закалочные эксперименты без визуального контроля выполнены приблизительно с 300 зернами. Конструкция термокамеры подробно описана в [Ionov et al., 2011]. В ходе экспериментов зерна нагревали на платиновой подложке до температуры 930 °C, при которой они выдерживались 30–40 мин. Закалка проводилась путем извлечения подложки из камеры. В камере поддерживалась восстановленная среда на уровне кислородного буфера ССО. Температуру нагрева контролировали с помощью Pt–PtRh<sub>10</sub>-термопары, калиброванной по точке плавления золота (1064 °C). После всех экспериментов отобрано и выведено на поверхность 30 расплавных включений размером от 13 до 115 мкм.

**Аналитические методы.** Изображения в отраженных электронах (BSE) и микрорентгено-спектральные химические анализы минералов и расплавных включений выполнены с помощью

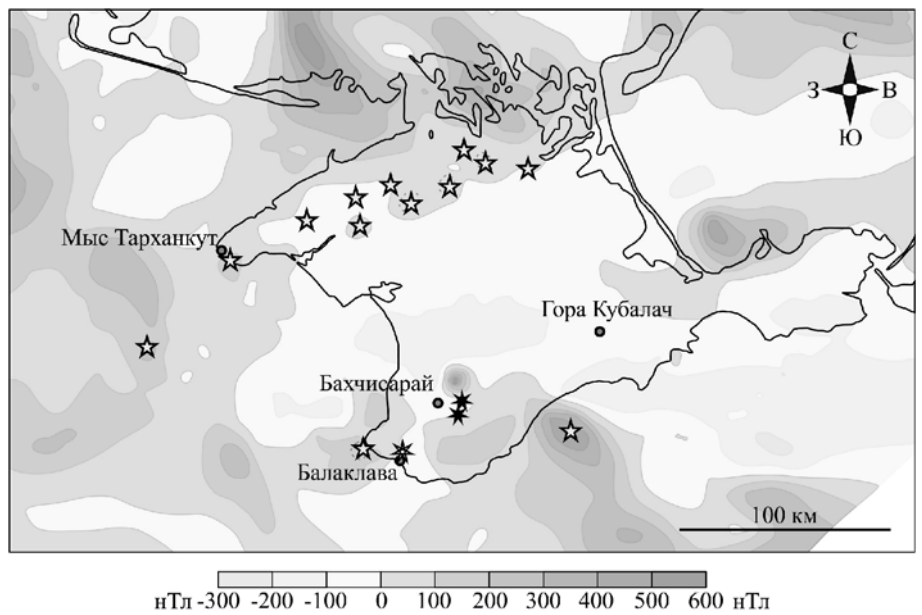


Рис. 1. Карта аномалий магнитного поля для территории Крыма, по [Гнидец и др., 2010]: 1 — точки отбора проб, 2 — точка отбора пробы в [Плечов, Попов, 2014], 3 — альбские палеовулканические центры по [Гнидец и др., 2010]

«Jeol JSM-6480LV» с приставкой «Oxford Instruments INCA-Energy 350» (МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра петрологии). Анализы выполняли при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 10 нА. Площадь анализируемой поверхности стекол и полевых шпатов составляла не менее 30 мкм<sup>2</sup>.

Профили состава плагиоклаза получены путем обработки BSE-изображений с помощью программы ImageJ по методике [Ginibre et al., 2002; Shcherbakov et al., 2011]. Для каждого профиля подготовлено отдельное BSE-изображение, для которого задавали зависимость оттенков серого цвета от состава. На основе этой зависимости построен профиль перпендикулярно грани кристалла.

Содержание воды в стеклах расплавных включений оценено методом конфокальной рамановской спектроскопии по методике [Le Losq et al., 2012] с помощью спектрометра «Horiba XPlORA» (МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра петрологии). В качестве стандартов использованы образцы Edf169 и Edf170, близкие к стеклам расплавных включений по кремнекислотности и NBO/T, с содержанием воды 1,47 и 3,03 масс.% соответственно.

**Результаты исследований. Петрографические характеристики.** Образцы Сель-Бухра-49 и Кача-55 имеют сходный облик — это литокристалло-кластические туффиты с карбонатно-глинистым, глинисто-карбонатным цементом, составляющим ~20 и ~40% объема породы соответственно. Обломочная часть породы представлена литокластами роговообманковых и плагиофировых палеоандезитов и палеодацитов, витрокристаллокластических палеотуффов, кристаллокластами плагиоклаза, кварца, роговой обманки, титаномагнетита и био-

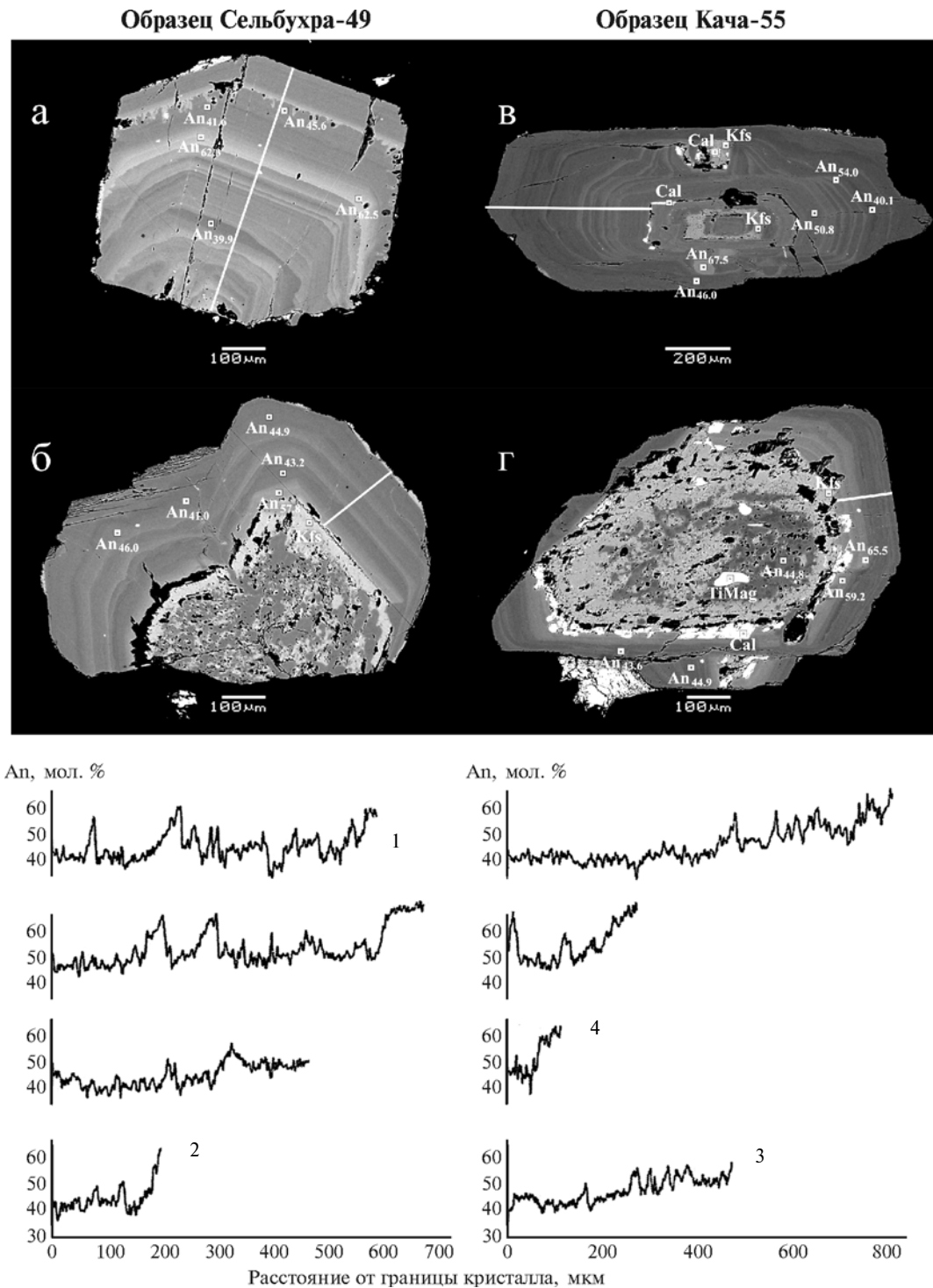


Рис. 2. Зональность плагиоклаза в туффи-тах из района Бахчисарая и ее диаграмма. Профили отмечены линиями, калибровочные точки — прямоугольниками. На фото нанесены значения измеренного состава плагиоклазов. Диаграммы 1, 2, 3, 4 соответствуют изображениям а, б, в, г

тита (единичные зерна в образце Сель-Бухра-49), а также окатанными обломками зерен кварца, кварцитов, монацитсодержащих биотит-кварцевых сланцев, фосфорита и глауконита и остатками фауны (в образце Кача-55). Пирокластический материал не окатан или окатан слабо. Размер обломков составляет в среднем 0,5 мм, иногда достигает 1,5–2 мм.

Литокласты роговообманковых и плагиофировых палеоандезитов и палеодацитов имеют порфириковую структуру. Вкрапленники размером ~0,3 мм представлены плагиоклазом, титаномаг-

нетитом и опацизированной роговой обманкой, основная масса — микролитами плагиоклаза, ксеноморфными выделениями калиевого полевого шпата и кварца.

В литокластах наблюдаются два типа опацизации роговой обманки — она либо опацизирована полностью, либо имеет опацитовую кайму шириной 50–100 мкм и частично опацизирована по объему. Участки кристаллов роговой обманки, которые не затронуты процессом опацизации второго типа, в литокластах полностью хлоритизированы.

Литокласты витрокристаллокластических палеотуфов представляют собой обломки, сложенные осколками кристаллов плагиоклаза и титаномагнетита в матрице из вторичных минералов.

Кристаллокласты плагиоклаза представлены целыми кристаллами или их обломками. Плагиоклаз имеет сложное строение (рис. 2) — губчатые или однородные ядра окружены ритмично-зональной каймой с несколькими зонами резорбции (до 3 и более). Состав плагиоклаза меняется от лабрадора, редко битовнита в центральных зонах, до андезина во внешних зонах (табл. 1, рис. 2).

По зонам резорбции в плагиоклазе часто развиты кальцит и калиевый полевой шпат (кпш) с содержанием альбитового минала 0,4–1,6 мол.% (табл. 1, рис. 2). Вкрапленники плагиоклаза в оболочках из кпш описаны в породах шошонитовых серий, где их образование связывают с ростом из расплава [Morrison, 1980]. При значениях температуры магматических процессов в кпш, равновесном с плагиоклазом, содержится не менее 20 мол.% альбитового минала [Kroll et al., 1993]. Учитывая состав кпш в изучаемых породах и его ассоциацию с кальцитом, мы предполагаем, что он имеет метасоматическое происхождение. В образце Кача-55, в котором доля нормально-осадочного материала выше, подобное замещение встречается чаще.

Кристаллокласты роговой обманки представлены целыми кристаллами и их обломками. Все составы (табл. 1) попадают в поле паргасита и магнезиогастингсита, по [Leake et al., 1997]. Плеохроизм в зеленых и желтовато-зеленых тонах, дисперсия  $r > v$  и максимальное двулучепреломле-

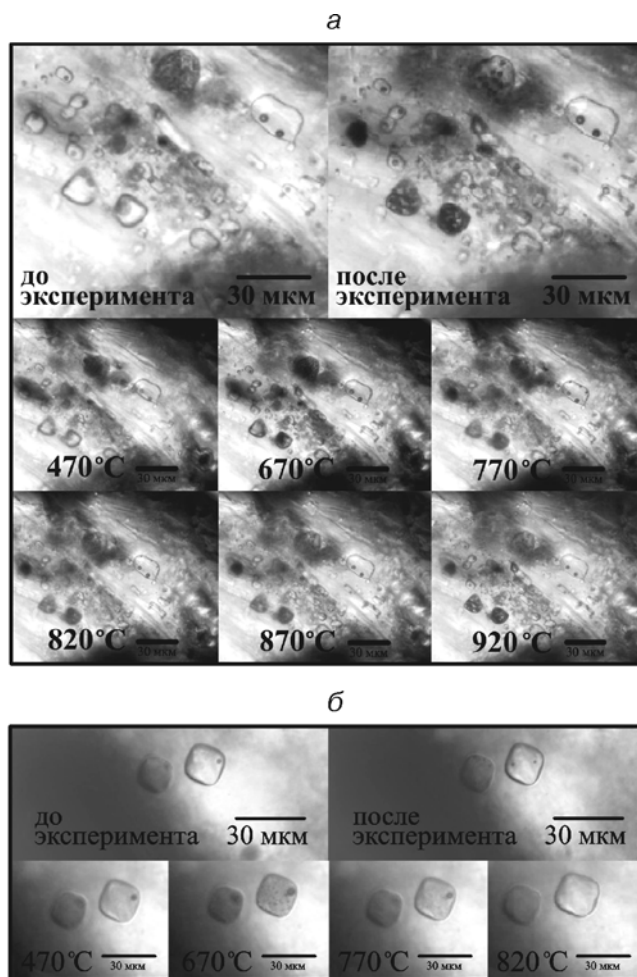


Рис. 3. Термограммы экспериментов по нагреву включений: а — для включений в плагиоклазе, б — для включений в кварце. Описание см. в тексте

Таблица 1

Представительные анализы кристаллокластов плагиоклаза, роговой обманки и калиевого полевого шпата, замещающего плагиоклаз

Фаза	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeOt	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Σ	An, мол.%	Mg#, мол.%
Plg(1)	47,82		33,34	0,34			16,40	2,24	0,10	100,24	80,2	
Plg(4)	50,69		30,94	0,33			13,96	3,70	0,17	99,78	67,6	
Plg(9)	52,90		29,76	0,33			12,27	4,50	0,19	99,95	60,1	
Plg(3)	54,68		28,68	0,32			10,93	5,28	0,25	100,13	53,4	
Plg(3)	55,60		28,23	0,20			10,25	5,48	0,27	100,05	50,8	
Plg(5)	56,13		27,50	0,23			9,64	5,92	0,34	99,74	47,4	
Plg(11)	56,98		27,27	0,25			9,25	6,14	0,33	100,22	45,5	
Plg(12)	57,51		26,50	0,27			8,58	6,48	0,37	99,72	42,2	
Plg(3)	59,06		25,64	0,27			7,46	7,08	0,51	100,03	36,8	
Kfs(1)	65,77		18,42	0,00			0,11	0,04	16,51	100,85		
Kfs(3)	65,32		18,42	0,09			0,07	0,09	16,18	100,16		
Kfs(1)	65,72		18,67	0,00			0,08	0,13	16,37	100,97		
Kfs(2)	64,99		18,48	0,00			0,06	0,17	16,54	100,23		
Hbl(1)	41,88	1,31	14,61	8,88	0,11	15,99	11,92	2,65	0,59	97,94		76,2
Hbl(1)	40,93	1,56	15,33	9,82	0,01	15,12	12,09	2,62	0,58	98,07		73,3
Hbl(2)	42,17	2,13	13,12	12,77	0,25	13,55	11,83	2,28	0,62	98,69		65,4
Hbl(2)	42,35	2,06	12,46	14,40	0,39	12,61	11,74	2,29	0,60	98,90		61,0

Примечания. Индексы минералов: Plg — плагиоклаз, Kfs — калиевый полевой шпат, Hbl — роговая обманка. В скобках — число анализов при усреднении. Составы приведены в масс.%, железо — в двухвалентной форме.

ние  $\delta \approx 0,020$  позволяют отнести роговую обманку к паргаситу. Магнезиальность кристаллокластов роговой обманки варьирует в пределах Mg# 61–76, она часто замещается по краям карбонатом или хлоритом.

**Расплавные включения.** Нами изучены расплавные включения в кварце и плагиоклазе. Они были стекловатыми (природно-закаленными) и содержали до 3 (редко больше) газовых пузырьков, суммарный объем которых не превышал 5% от объема включений. Условия консервации включений определены в ходе серии термометрических экспериментов с визуальным контролем по описанной выше методике.

Включения в кварце и плагиоклазе оставались стекловатыми при нагреве до 450 °С, после чего в них начиналась раскристаллизация дочерних фаз (рис. 3). Плавление дочерних фаз происходило в диапазоне 600–760 °С. К концу указанного интервала дочерние минералы внутри включений

практически полностью исчезли, но вместо них появилось множество мелких пузырьков, которые постепенно исчезали при нагреве до 820–860 °С. При дальнейшем нагреве до 962 °С видимые изменения во включениях не происходили. Таким образом, температуру консервации включений можно оценить в 820–860 °С.

Для ~300 зерен плагиоклаза и кварца из обоих образцов проведены закалочные эксперименты без визуального контроля с нагревом до 930 °С по описанной выше методике, после чего для дальнейшего изучения отобраны зерна с крупными первичными расплавными включениями.

Для оценки влияния эффектов граничного слоя [Плечов, 2014] и отбора представительных составов включений нами построены графики зависимости составов включений от их размеров.

Отношения  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (масс.%) для расплавных включений в кварце не проявляют никакой зависимости от размера (рис. 4, а). Они отражают

Таблица 2

Представительные анализы стекол расплавных включений в плагиоклазе (Plg(N)) и кварце (Qtz(N)) из верхнеальбских туффов в районе Бахчисарая и реконструированные составы расплавов (M-1–M-11)

Минерал-хозяин	Ап, мол. %	Размер включения, мкм	% плавления минерала-хозяина	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	F	Σ
Plg(1)	46,7	27		67,33	0,23	14,31	0,98	0,06	0,15	2,65	4,03	3,09	0,09	0,05	0,15	0,27	93,41
Plg(1)	46,1	116		66,99	0,45	13,98	1,89	0,09	0,53	1,94	4,02	2,98	0,11	0,29	0,27	0,08	93,62
Plg(1)	42,4	30		69,77	0,19	13,87	0,97	0,10	0,15	2,16	3,54	3,66	0,10	0,12	0,13	0,37	95,13
Plg(3)	47,5	67		71,47	0,17	13,97	0,96	0,07	0,21	2,15	3,73	3,42	0,05	0,14	0,10	0,30	96,75
Qtz(3)		76		69,03	0,19	12,80	1,46	0,03	0,18	1,67	3,54	3,38	0,04	0,12	0,25	0,16	92,87
Qtz(3)		105		71,18	0,15	10,18	1,34	0,02	0,14	1,30	3,55	2,91	0,06	0,11	0,19	0,19	91,33
Qtz(3)		77		74,03	0,13	11,92	1,42	0,03	0,15	1,50	3,99	3,17	0,05	0,11	0,21	0,22	96,92
Qtz(2)		47		72,45	0,18	11,97	1,49	0,01	0,15	1,49	3,83	3,18	0,11	0,08	0,22	0,33	95,51
Qtz(1)		47		71,42	0,15	11,98	1,41	0,00	0,14	1,63	3,91	3,06	0,00	0,03	0,23	0,45	94,42
Qtz(1)		37,0		75,55	0,16	10,80	1,10	0,00	0,14	1,32	3,01	3,07	0,00	0,03	0,23	0,60	96,02
Qtz(1)		20,0		74,19	0,12	11,23	1,34	0,07	0,10	1,50	3,34	3,14	0,13	0,00	0,21	0,04	95,41
Host Plg				56,71		27,30	0,24			9,34	6,08	0,33					100
M-1			13	74,85	0,28	13,63	1,18	0,07	0,18	1,88	4,08	3,77	0,11	0,07	0,19	0,34	100
M-2*			12	75,00	0,32	13,52	1,15	0,11	0,66	1,11	4,13	3,64	0,14	0,36	0,33	0,10	100
M-3			6	74,90	0,21	13,87	1,08	0,11	0,16	1,83	3,59	4,10	0,12	0,13	0,14	0,41	100
M-4			4	74,96	0,18	13,98	1,03	0,08	0,23	1,94	3,78	3,68	0,05	0,15	0,11	0,33	100
Host Qtz				100													100
M-5			0	74,71	0,21	13,86	1,58	0,03	0,19	1,81	3,83	3,66	0,05	0,13	0,27	0,18	100
M-6			14	74,80	0,19	13,02	1,71	0,03	0,18	1,66	4,54	3,72	0,08	0,14	0,24	0,25	100
M-7			8	74,74	0,15	13,43	1,60	0,03	0,17	1,69	4,49	3,57	0,05	0,12	0,24	0,24	100
M-8			6,5	74,74	0,21	13,50	1,68	0,01	0,17	1,68	4,32	3,59	0,13	0,09	0,25	0,38	100
M-9			5	74,94	0,17	13,45	1,59	0,00	0,16	1,83	4,39	3,44	0,00	0,04	0,26	0,50	100
M-10			18	74,85	0,21	13,83	1,41	0,00	0,19	1,69	3,85	3,93	0,00	0,04	0,30	0,77	100
M-11			13	74,80	0,14	13,59	1,62	0,08	0,12	1,81	4,04	3,80	0,15	0,00	0,25	0,05	100
Среднее по расплавам				74,84	0,20	13,61	1,45	0,05	0,22	1,72	4,10	3,72	0,08	0,12	0,23	0,32	100

Примечания. 1–3 — число анализов для включения; Ап — количество анортитовой составляющей в плагиоклазе-хозяине, мол.%. Размер включения измеряли по удлинению, состав — в масс.%; железо — в двухвалентной форме. Для расплавов приведена сумма без учета летучих. Для расплава, отмеченного звездочкой, также введена поправка на плавление 1,2% TiMag; HostPlg и HostQtz — использованные в расчетах составы минералов-хозяев. В последней строке — усредненный состав расплавов.

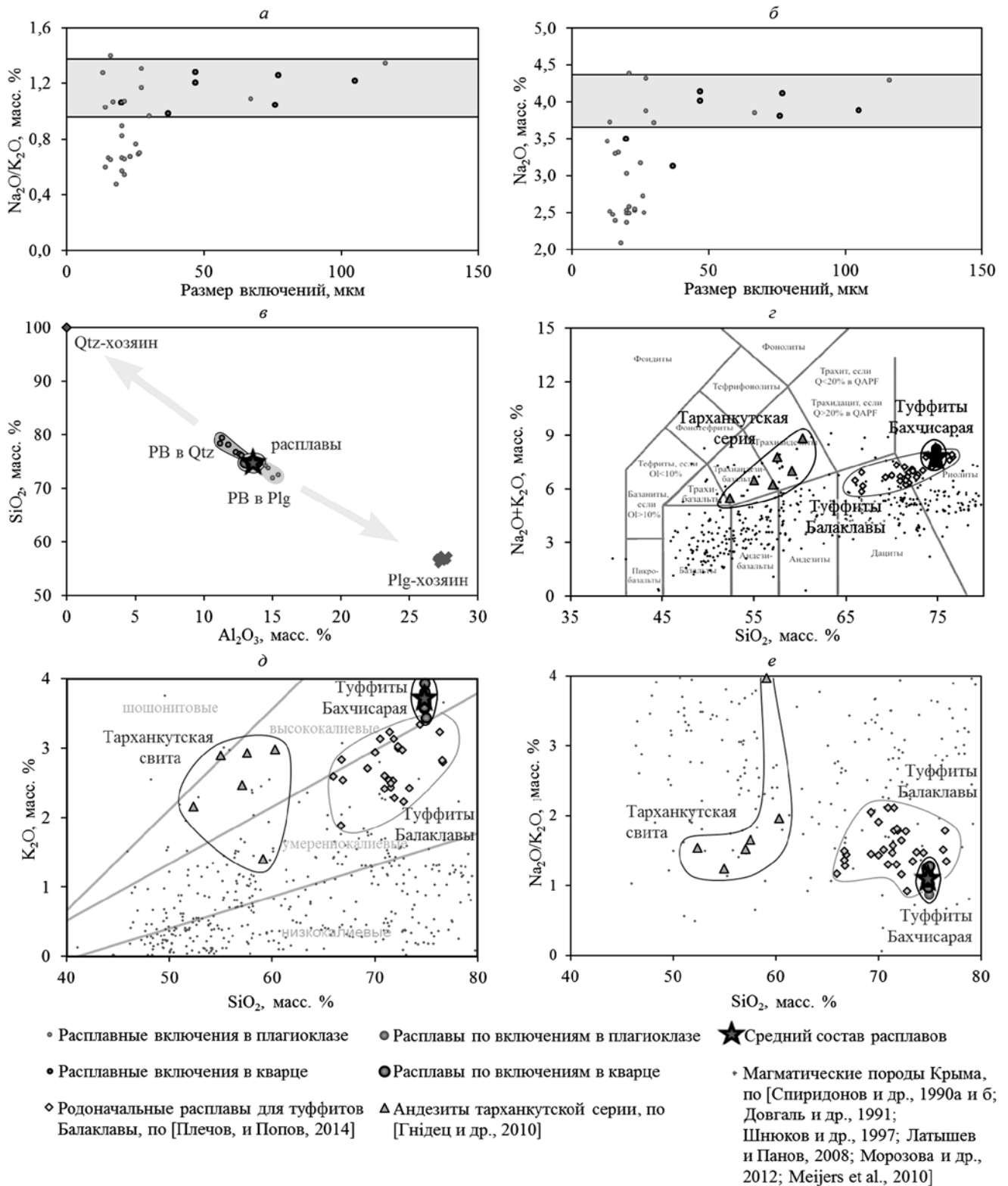


Рис. 4. Составы расплавных включений и расплавов, скорректированных на плавление минерала-хозяина, в сравнении с разновозрастными магматическими породами Крыма, по [Спиридонов и др., 1990а, 1990б; Довгаль и др., 1991; Шнюков и др., 1997; Латышев и Панов, 2008; Гнидец и др., 2010; Морозова и др., 2012; Плечов, Попов, 2014; Meijers et al., 2010]; а-б — сравнение расплавных включений в плагиоклазе и кварце; а-б — зависимость состава включений в кварце и плагиоклазе от их размера; в — зависимость содержания  $\text{SiO}_2$  от  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для включений в кварце и плагиоклазе в сравнении с таковой для скорректированных расплавов; г-е — сравнение расплавных включений с магматическими породами Крыма; г — зависимость содержания суммы щелочей от  $\text{SiO}_2$  (масс.%) (поля на диаграмме нанесены по [Le Bas et al., 1986]); д — зависимость содержания  $\text{K}_2\text{O}$  от  $\text{SiO}_2$  (масс.%) (поля на диаграмме нанесены по [Gill, 1981]); е — зависимость отношений  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  от  $\text{SiO}_2$  (масс.%)

исходное отношение  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  в захваченных расплавах, так как не могло измениться в ходе кристаллизации минерала-хозяина на стенках при остывании в магматическом очаге или при плавлении излишнего его объема в ходе закалочных экспериментов. Отношение  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  для крупных расплавных включений в плагиоклазе варьирует в тех же пределах, что и для включений в кварце. Для включений размером  $<30$  мкм характерны большие вариации этого параметра, что можно объяснить разным вкладом трех основных процессов: во-первых, влиянием граничного слоя на состав включений — захват включений, размер которых сопоставим с шириной граничного слоя, ведет к уменьшению указанного соотношения; во-вторых, кристаллизацией минерала-хозяина на стенках включения при остывании, что также ведет к уменьшению обсуждаемого соотношения; в-третьих, плавлением излишнего объема минерала-хозяина во время закалочных экспериментов, которое ведет к увеличению указанного соотношения.

Содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  (масс.%) в мелких включениях в кварце и плагиоклазе в целом ниже, чем в крупных, хотя для мелких включений в плагиоклазе наблюдаются большие вариации значений (рис. 4, б). Такие зависимости также могут быть обусловлены разным вкладом описанных выше трех процессов.

Для оценки составов магматических расплавов нами отобраны все включения в кварце и наиболее крупные включения в плагиоклазе, отношение  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  в которых соответствует таковому во включениях в кварце, а содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  близко к таковому в самых крупных включениях. Их составы приведены в табл. 2.

Включения в кварце по сравнению со включениями в плагиоклазе характеризуются в целом более высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  и пониженным  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 4, в), что объясняется их перегревом в ходе закалочных экспериментов [Плечов, 2014]. Составы магматических расплавов получены путем корректировки составов расплавных включений на плавление минерала-хозяина (табл. 2). Процент плавления минерала-хозяина подбирали путем минимизации расхождений составов расплавных включений в разных минералах по всем элементам.

Магматические расплавы имеют риолитовый состав, по содержанию  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  (масс.%) попадают в область высококалиевых серий нормальной щелочности (близко к границе с умеренно-калиевыми сериями), характеризуются отношением  $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2 \geq 2$  (масс.%; табл. 2, рис. 4, г, д). Содержание воды в расплавах достигает 4 масс.%.  
**Обсуждение результатов. Петрография.** Туфогенные отложения из разных обнажений в районе Бахчисарая имеют близкие петрографи-

ческие черты, однако степень их измененности и количество нормально-осадочного материала в них варьируют. Сходство петрографии литокластов и минерального состава кристаллокластов в разных точках наблюдения свидетельствует о том, что эта туфогенная толща образовалась в результате деятельности одного вулканического центра. Различия между минеральным составом литокластов и кристаллокластов (наличие свежей роговой обманки и кварца в кристаллокластах, которых нет в литокластах) и петрографические различия литокластов (разный характер опацификации роговой обманки) свидетельствуют о том, что литокласты и кристаллокласты — продукты разных извержений, причем материал литокластов мог сформироваться в результате нескольких извержений и присутствует в туффитах в качестве резургентного материала.

Главный темноцветный минерал в изучаемых туффитах — роговая обманка, что роднит их с другими позднеальбскими вулканогенными образованиями на территории п-ова Крым, для которых характерно обилие амфибола [Лебединский, Макаров, 1962; Гнідец и др., 2010; Никишин и др., 2013; Плечов, Попов, 2014]. При этом для других вулканитов Крыма и прилегающих территорий амфибол не характерен. Так, в работе [Шнюков и др., 1997] роговая обманка в вулканитах Ломоносовского поднятия не описана, подчеркнута ее ограниченное распространение среди крымских вулканитов.

Среди альбских вулканитов к изучаемым туффитам петрографически ближе вулканиты тарханкутской свиты и туффиты г. Кубалач, в которых в качестве кристаллокластов описаны в основном зеленая роговая обманка, кварц и плагиоклаз [Лебединский, Макаров, 1962; Гнідец и др., 2010]. Состав плагиоклаза близок к таковому из изучаемых пород — он варьирует в пределах  $\text{An}_{30}\text{—An}_{47}$ , достигая изредка  $\text{An}_{20}$ , в вулканитах тарханкутской свиты [Гнідец и др., 2010] и в пределах  $\text{An}_{39}\text{—An}_{44}$  в туфогенной толще г. Кубалач [Лебединский, Макаров, 1962].

Петрография литокластов и минеральный состав кристаллокластов туффитов в районе Бахчисарая отличает их и от туфогенной толщи в районе Балаклавы, где в качестве кристаллокластов встречен клинопироксен, но не отмечен кварц. В туффитах Балаклавы описаны в целом более магнезиальная роговая обманка ( $\text{Mg}\# 75\text{—}84$ ) и основной плагиоклаз ( $\text{An}_{42}\text{—An}_{82}$ ) [Плечов, Попов, 2014]. Главные петрографические отличия литокластов в туффитах Бахчисарайского района — характер опацификации и степень измененности роговой обманки, отсутствие клинопироксена во вкрапленниках и наличие кпш и кварца в основной массе пород.

Еще одна характерная петрографическая черта туффитов из района Бахчисарая — наличие в них

обломков монацитсодержащих биотит-кварцевых сланцев. Монацит часто встречается в терригенных породах на территории Украины. Основными его источниками считают Украинский щит и неизвестный источник западнее него [Андреев и др., 2010]. Оба этих источника находятся севернее современной территории Крыма. Наличие монацита в изучаемых породах свидетельствует о прямом сносе осадочного материала со стороны Восточно-Европейской платформы. Это заключение согласуется с реконструкциями строения осадочного бассейна в работе [Гнідец и др., 2010].

**Петрохимия пород и физико-химические условия в магматическом очаге.** Как упомянуто выше, магматические расплавы имеют риолитовый состав и попадают в область высококальциевых серий нормальной щелочности. Содержание воды в расплавах достигало 4 масс.%. О высокой концентрации воды в магматическом очаге также свидетельствует наличие роговой обманки в качестве кристаллокластов и вкрапленников в литокластах — согласно экспериментальным данным для кристаллизации этого минерала из расплава необходимо не менее 4 масс.% растворенной в нем воды [Rutherford, Hill, 1993].

По результатам термометрических экспериментов и равновесию плагиоклаз—расплав температуру в магматическом очаге перед извержением можно оценить в 820–860 °С. При этом сложная зональность плагиоклаза и наличие многочисленных зон растворения в нем свидетельствуют о неоднократных колебаниях температуры и содержания воды. Согласно [Shcherbakov et al., 2011], такие существенные колебания обычно связаны с подпиткой магматического очага новыми порциями более горячей магмы.

Допуская флюидонасыщенность исходных магматических расплавов, можно дать минимальную оценку давления в магматическом очаге — по модели растворимости воды [Newman, Lowerstern, 2002] оно составляло не менее 0,1 ГПа, что соответствует глубине ~3 км.

По составу, в частности отношению  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ , содержанию  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  (масс.%), полученные расплавы наиболее близки к расплавам туффитов из района Балаклавы, однако отличаются от них тем, что образуют компактную группу более продвинутых по  $\text{SiO}_2$  составов (рис. 4, з, е). Данные геотермобарометрии показывают схожие условия кристаллизации минералов вкрапленников в туффитах из района Балаклавы (850–930 °С и 0,3–0,35 ГПа) [Плечов, Попов, 2014]. Более высокие оценки давления в магматическом очаге связаны с тем, что учитывалось содержание  $\text{CO}_2$  в расплаве, который существенно снижает растворимость воды в нем [Newman, Lowerstern, 2002], при этом содержание воды в расплавах туффитов из района Балаклавы близкое (~4,5 масс.% воды) [Плечов, Попов, 2014].

Для вулканитов тарханкутской свиты опубликовано всего несколько валовых анализов пород, которые, как следует из описания и фотографий шлифов, подверглись значительному вторичному преобразованию — карбонатизации и хлоритизации [Гнідец и др., 2010]. Несмотря на то что петрографически эти породы описаны как андезиты, по петрохимии они относятся к породам повышенной щелочности и в координатах TAS попадают в поле трахиандезитов—трахиандезитов. Они характеризуются более высоким содержанием  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ , но имеют близкое отношение  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (масс.%; рис. 4, з, е). Для туфогенной толщи г. Кубалач анализы не опубликованы.

По составу родоначальные расплавы для туффитов в районах Балаклавы и Бахчисарая, а также андезиты тарханкутской свиты не имеют полных известных аналогов на территории п-ова Крым (рис. 4, з, е). Наиболее близки к ним составы некоторых представителей так называемого комплекса малых интрузий (например, состав наиболее кислых разностей массива Кагель) и вулканитов Кара-Дага. Однако минимальные оценки возраста массива Кагель и пород Кара-Дага составляют  $149 \pm 10,9$  [Соловьев, Рогов, 2010] и 152–142 млн лет [Meijers et al., 2010] соответственно, что на ~40 млн лет превышает возраст изучаемых пород и не позволяет относить их к одной серии.

**Условия накопления и источник сноса.** В работах [Лебединский, Макаров, 1962; Никишин и др., 2013; Плечов, Попов, 2014] отмечается хорошая сохранность кристаллов плагиоклаза из верхнеальбских туффитов. Для туффитов г. Кубалач и из района Бахчисарая [Лебединский и Макаров, 1962; Никишин и др., 2013] это интерпретируют как результат переноса пирокластики по воздуху с последующим накоплением ее в мелководных условиях (о чем свидетельствует наличие в них нормально-осадочного материала). Для туффитов из района Балаклавы предложен другой механизм образования — в результате схода мутьевых потоков после надводного извержения [Никишин и др., 2013] или же во время подводного извержения вспененной лавы (пемзы) с последующей селективной сепарацией литокластов и кристаллокластов из нее по плотности и формированием мутьевых потоков (пемза при этом может переноситься на большие расстояния по поверхности воды) [Плечов, Попов, 2014]. Авторы склоняются к второму механизму формирования для туффитов из района Бахчисарая, поскольку он лучше объясняет равномерное распределение нормально-осадочного материала среди обломков пирокластики одного извержения.

Авторы работы [Никишин и др., 2013] рассматривают возможность формирования туффитов из района Бахчисарая в результате деятельности палеовулканических центров в районе Балаклавы или же приуроченных к Каркинитскому грабену.



Нами показано, что эти туффиты петрографически ближе к туффитам г. Кубалач и вулканитам тарханкутской свиты. Большая удаленность проявлений туффитов (70–90 км) не позволяет уверенно утверждать, что они сформировались в результате деятельности одних и тех же вулканических центров. Возможно, помимо палеовулканов в районе Каркинитского грабена на территории п-ова Крым существовали погребенные в настоящее время под осадочным чехлом аналогичные палеовулканические центры или же они находятся южнее современной береговой линии. Последнее выглядит сомнительным, так как тоже предполагает большое расстояние от эруптивного центра и не согласуется с установленным направлением сноса нормально-осадочного материала со стороны Восточно-Европейской платформы.

#### **Геодинамическая обстановка формирования.**

Авторы работы [Плечов, Попов, 2014] на основе изучения петрографических и петрохимических особенностей и содержания летучих компонентов заключили, что туффиты из района Балаклавы образовались в надсубдукционной обстановке, вероятно, в условиях активной континентальной окраины, что согласуется с основанными на геохимических особенностях пород выводами о надсубдукционной природе этих вулканитов в работе [Никишин и др., 2013]. В качестве современного аналога геодинамической обстановки Крыма в альбское время рассматривается Аляска, где, несмотря на ее длительное нахождение в условиях активной континентальной окраины, вулканизм проявлен довольно ограниченно [Плечов, Попов, 2014].

Для описываемых пород справедливы те же аргументы, это свидетельствует об их надсубдукционной природе: во-первых, это сложная зональность плагиоклаза со следами неоднократного растворения — кристаллы с губчатыми ядрами и ритмично-зональной каймой, содержащие до нескольких зон резорбции. Подобная зональность плагиоклаза обычно обусловлена существованием долгоживущего магматического очага, периодически подпитывавшегося порциями более

основной и горячей магмы, что характерно для надсубдукционных условий; во-вторых, наличие вкрапленников магнетита в литокластах, что свидетельствует о высокой фугитивности кислорода в магматическом очаге — характерном признаке надсубдукционных магм; в-третьих, обилие опацизированной роговой обманки, также характерной для надсубдукционных магм среднего и кислого состава; в-четвертых, петрохимические черты магматических расплавов и высокое содержание воды в них, что согласуется с гипотезой об их надсубдукционной природе.

Кислые расплавы могут образоваться в результате длительного фракционирования основной магмы или за счет частичного плавления корового субстрата. И то, и другое возможно только при наличии достаточно мощной коры, что служит косвенным доводом в пользу обстановки активной континентальной окраины. Другой косвенный довод — наличие в изучаемой толще обломков монацитсодержащих биотит-кварцевых сланцев в качестве нормально-осадочного материала, что указывает на прямой снос терригенного материала с Восточно-Европейской платформы в зону активного вулканизма.

**Заключение.** Изучение позднеальбских туффитов в районе Бахчисарая показало, что эти породы схожи с другими позднеальбскими вулканитами на территории Крыма — породами тарханкутской свиты и г. Кубалач, в меньшей степени из района Балаклавы. Они представляют собой продукты извержения риолитовой магмы, содержавшей кристаллы плагиоклаза, кварца и роговой обманки.

Посредством изучения расплавных включений в кварце и плагиоклазе оценены физико-химические условия в магматическом очаге — кристаллизация минералов вкрапленников проходила в интервале температуры 820–860 °С и при давлении не менее 0,1 ГПа. Петрографические черты этих пород и петрохимия родоначальных для них расплавов свидетельствуют о надсубдукционной обстановке их образования, скорее всего, в условиях активной континентальной окраины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев А.А., Андреев А.В., Степанюк Л.М. и др. К проблеме источника неопротерозой-палеозойских монацитов в осадочных образованиях Украины // Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2010. № 3. С. 232–238.

Барбошкин Е.Ю. Новая стратиграфическая схема нижнемеловых отложений междуречья Качи–Бодрака (Юго-Западный Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1997. № 3. С. 22–29.

Гнідець В.П., Григорчук К.Г., Захарчук С.М. и др. Нафтогазоперспективні об'єкти України. Геологія нижньої крейди Причорноморсько-Кримської нафтогазоносної області (геолого-структурні умови, седименто-літогенез, породи-колектори, перспективи нафтогазоносності). Київ: ЕКМО, 2010. 247 с.

Довгаль Ю.М., Радзивил В.Я., Токовенко В.С. Вулканы Карадага. Киев: Наукова думка, 1991. 104 с.

Копеевич Л.Ф., Хотылев А.О. Стратиграфическое положение меловых вулканитов в Крыму и на Северном Кавказе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 6. С. 59–69.

Латышев А.В., Панов Д.И. Юрские магматические тела Горнокрымской зоны в бассейне р. Бодрак (Юго-Западный Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2008. № 2. С. 22–30.

Лебединский В.И., Макаров Н.Н. Вулканизм Горного Крыма. Киев: Изд-во АН УССР. 1962. 208 с.

Морозова Е.Б., Сергеев С.А., Суфиев А.А. U–Pb цирконовый (SHRIMP) возраст джидайской интрузии как реперного объекта для геологии Крыма (Крымский

- учебный полигон СПбГУ) // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2012. № 4. С. 25–33.
- Никишин А.М., Хотылев А.О., Бычков А.Ю. и др.* Меловые вулканические пояса и история формирования Черноморского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 2. С. 6–18.
- Плечов П.Ю.* Методы изучения флюидных и расплавных включений. М.: КДУ, 2014. 266 с.
- Плечов П.Ю., Попов Д.В.* Характер вулканической активности в Юго-Западном Крыму в позднеальбское время // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 5. С. 29–39.
- Соловьев А.В., Рогов М.А.* Первые трековые датировки цирконов из мезозойских комплексов полуострова Крым // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2010. Т. 18. № 3. С. 74–82.
- Спиридонов Э.М., Федоров Т.О., Ряховский В.М.* Магматические образования Горного Крыма. Статья 1 // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1990а. Т. 65, № 4. С. 119–134.
- Спиридонов Э.М., Федоров Т.О., Ряховский В.М.* Магматические образования Горного Крыма. Статья 2 // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1990б. Т. 65, № 4. С. 102–112.
- Шнюков Е.Ф., Щербаков И.Б., Шнюкова Е.Е.* Палеоостровная дуга севера Черного моря. Киев: НАНУ, 1997. 288 с.
- Gill J.* Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 390 p.
- Ginibre C., Kronz A., Wörner G.* High-resolution quantitative imaging of plagioclase composition using accumulated backscattered electron images: new constraints on oscillatory zoning // Contrib. Mineral. and Petrol. 2002. Vol. 142, Iss. 4. P. 436–448.
- Ionov D.A., Benard A., Plechov P.Y.* Melt evolution in subarc mantle: evidence from heating experiments on spinel-hosted melt inclusions in peridotite xenoliths from the andesitic Avacha volcano (Kamchatka, Russia) // Contrib. Mineral. and Petrol. 2011. Vol. 162, Iss. 6. P. 1159–1174.
- Kroll H., Evangelakakis C., Voll G.* Two-feldspar geothermometry: a review and revision for slowly cooled rocks // Contrib. Mineral. and Petrol. 1993. Vol. 114, Iss. 4. P. 510–518.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S. et al.* Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names // Canad. Mineral. 1997. Vol. 35, Iss. 1. P. 219–246.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B.* A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram // J. Petrology. 1986. Vol. 27, Iss. 3. P. 745–750.
- Le Losq C., Neuville D.R., Moretti R., Roux J.* Determination of water content in silicate glasses using Raman spectrometry: Implications for the study of explosive volcanism // Amer. Mineral. 2012. Vol. 97, Iss. 5–6. P. 779–790.
- Meijers M.J.M., Vrouwe B., van Hinsbergen D.J.J. et al.* Jurassic arc volcanism on Crimea (Ukraine): Implications for the paleo-subduction zone configuration of the Black Sea region // Lithos. 2010. Vol. 119, Iss. 3–4. P. 412–426.
- Morrison G.W.* Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association // Lithos. 1980. Vol. 13, Iss. 1. P. 97–108.
- Newman S., Lowerstern J.B.* VolatileCalc: a silicate melt-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> solution model written in Visual Basic for EXCEL // Computers & Geosci. 2002. Vol. 28, Iss. 5. P. 597–604.
- Rutherford M.J., Hill P.M.* Magma ascent rates from amphibole breakdown; an experimental study applied to the 1980–1986 Mount St. Helens eruptions // J. Geophys. Res. Solid Earth. 1993. Vol. 98, Iss. B11. P. 19667–19685.
- Shcherbakov V.D., Plechov P.Yu., Izbekov P.E., Shipman J.S.* Plagioclase zoning as an indicator of magma processes at Bezymianny Volcano, Kamchatka // Contrib. Mineral and Petrol. 2011. Vol. 162, Iss. 1. P. 83–99.

Поступила в редакцию  
30.10. 2014