

© Е.Ф. Шнюков¹, Э.В. Сокол², Е.Н. Нигматулина², С.А. Коржова²,
И.Н. Гусаков³, 2009

¹Отделение морской геологии и осадочного рудообразования НАНУ, Киев

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

³ПО «Кубаньгеология», Краснодар

«ОГНЕННОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ» ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА КАРАБЕТОВА ГОРА, 2000 г.: сценарий события, продукты извержения, минералогия и петрография плавленых пород

Приведены результаты комплексного изучения химического и фазового состава исходной и обожженной в режиме термоудара сопочной брекчии.

Введение

Возникновение и эволюция грязевых вулканов напрямую связаны с явлением дегазации земных недр. Газовые струи различного дебита и состава распространены повсеместно в провинциях грязевого вулканизма. Масштабы газовой эмиссии изменяются на порядки как для одной территории в ходе ее геологической истории, так и для разных регионов. Большую часть времени истечение газов происходит в режиме эманации. Стремительный прорыв к поверхности малоплотных газонасыщенных и в различной мере обводненных породных масс обычно завершается извержениями, сценарии которых варьируют от спокойного истечения грязевых потоков до взрывов, уничтожающих более ранние постройки. В ряде провинций (прежде всего, в Азербайджане, Иране, Курдистане и на о. Тринидад) эти извержения регулярно сопровождаются «огненными явлениями» – возгораниями газовых факелов и струй. Их длительность варьирует от десятков минут до нескольких лет, достигая в единичных случаях сотен лет (Апшерон) [3,12,14,15,17,19], тогда как период активности самих вулканов достигает миллионов лет. Таким образом «огненные явления» – это мгновенные эпизоды в истории любого грязевого вулкана.

В наземных условиях тепловая энергия газовых пожаров преобразует материал сопочной брекчии в специфические пирометаморфические породы. В случае площадной инфильтрации и горения газов развиваются температуры до 700–900°C, происходит дегидратация, декарбонатизация, спекание и частичное плавление осадков [3,10,12,19]. Породы, контактирующие с горящими газовыми струями, могут разогреваться до 1300–1500°C, что обеспечивает валовое плавление пелитового и мергелистого протолитов. Пирогенные плавленые породы – паралавы – не имеют магматических аналогов. Их геологическая позиция, химический и фазовый состав абсолютно уникальны [8,18]. Совокупность структурно-вещественных характеристик выводит эту группу метаморфических пород в ранг индикаторов наиболее высокотемпературных пирогенных процессов, обусловленных горением горючих газов и нефти [8,20].

При реконструкциях режима истечения и горения газов, момента воспламенения газовой струи и длительности этих процессов геологи в большинстве случаев вынуждены опираться на архивные данные, результаты анализа продуктов извержений и свидетельства очевидцев.

Взрывные извержения грязевых вулканов, сопровождающиеся воспламенением газов, не редки для территории Таманской провинции и в основном катастрофические или бурные. За период с 1818 года 12 из 77 извержений сопровождались «огненными явлениями» [12]. Это извержения грязевых вулканов горы Бориса и Глеба (3 из 4), Карabetовой горы (5 из 24), Голубицкого морского вулкана (2 из 19), Цимбалы Западные (1 из 3) и горы Миска (1 из 5). Данная статья посвящена описанию извержения грязевого вулкана Карabetова гора в мае 2000 г., а также характеристике уникальных продуктов обжига сопочной брекчии, возникших при воспламенении газового факела.

Извержение вулкана Карabetова гора 6 мая 2000 г.

Грязевый вулкан Карabetова гора расположен на Таманском полуострове в пределах одноименной антиклинали, ядро которой облекают породы чокракского и караганского ярусов. В составе твердых выбросов этого вулкана преобладают породы майкопских и, в меньшей мере, сарматских отложений. Область питания вулкана находится на глубине 4.5-9 км [7,12]. Карabetова гора отличается частыми катастрофическими извержениями. Извержение, произошедшее ранним утром 6 мая 2000 года, по объему твердых выбросов было небольшим – диаметр поля свежей сопочной брекчии не превышал 30 м. Однако оно сопровождалось появлением эффектного огненного факела. По свидетельствам очевидцев, извержению предшествовал взрыв, затем вслед за сильным хлопком в атмосфере возникла яркая вспышка и произошло воспламенение газового столба. Горящая часть факела имела шаровидную форму и яркое белое свечение. Факел был виден с расстояния 5–6 км, а его высота составляла 300–400 м. После того, как факел погас, появился белесый туман.

Среди продуктов этого извержения преобладал газ. О величине избыточного газового давления в момент взрыва косвенным образом свидетельствует радиус зоны разброса пород. Глыбы объемом до 2 м³ были выброшены на расстояние до 30 м. По данным И.Н. Гусакова, минимальная величина газового фактора, характерная для грязевых вулканов Тамани в момент извержения, равняется 700 (1 м³ грязи/700 м³ газа), максимальная – 1200. Общее количество выброшенной грязи, по оценкам И.Н. Гусакова, не превышало 60 тонн. Она имела тугопластичную консистенцию, о чем свидетельствуют многочисленные зеркала скольжения, сохранившиеся благодаря обжигу фрагментов глинистых пород в факеле (рис. 1). Они возникали при прохождении сопочных брекчий через узкое жерло. Количество воды в продуктах этого выброса было незначительным. Эти факты позволяют оценить объем газового выброса извержения вулкана Карabetова гора (2000 г.) в диапазоне от 21 до 36 млн. м³ (при плотности обводнения сопочной брекчии порядка 2 кг/м³).

После взрыва на периферии ранее существовавшего кратера образовалась новая кратерная воронка диаметром 15–20 м и глубиной 4 м. Жерло



Рис. 1. Зеркало скольжения на фрагменте тугопластичной сопочной брекчии, сохранившееся благодаря обжигу в газовом факеле. Грязевый вулкан Карabetова гора. Продукты извержения 2000 г. Фото 2008 г.

сразу же после газового выброса стало затягиваться вязкой грязью. Через 4 часа после взрыва, когда на место извержения прибыл И.Н. Гусаков, воронка уже была затянута грязью полностью, и воды в ней не было. Из новообразованных трещин повсеместно со свистом выходил газ. Он горел на протяжении 6 дней только в одной крупной трещине около 2 м шириной, куда выходили открытые каналы до 1 м в диаметре. Позднее от брошенного листка зажженной бумаги мгновенно со взрывом загорелось все сопочное поле, разбитое трещинами.

Тугопластичная консистенция продуктов извержения и высокий газовый фактор привели к появлению серий радиальных и концентрических трещин, разбивших околokrатерные валы. Каждую из трещин сопровождал мощный выход горящих газов. Это привело к повсеместному распространению в трещинной зоне пород, обожженных до кирпичного состояния. На периферии новообразованного кратера сопочные брекчии также оказались обожжены до кирпичного состояния, реже были ошлакованы. Спустя 4 часа обожженные блоки, опрокинутые более поздними выбросами грязи, еще оставались теплыми. Термическое воздействие в этих зонах не привело к спеканию пород, а лишь вызвало характерную для начальных стадий обжига аморфизацию слоистых силикатов. Вследствие этого при полевом обследовании зоны извержения в 2008 году свидетельства обжига пород сохранились лишь внутри трещин, тогда как на поверхности слабо обожженные породы оказались практически целиком разрушены.

Методы исследования

Комплексное изучение химического и фазового состава исходной и обожженной сопочной брекчии грязевого вулкана Карabetова гора выполнено в аналитических центрах Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) и Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). *Качественный рентгенофазовый анализ* использован при определении фазового состава образцов. Работа выполнена по стандартной методике на дифрактометре ДРОН-3 ($Cu_{K\alpha}$ -излучение, $U=30-0$ кВ, $I=30$ мА, скорость движения счетчика – 1° /мин, скорость движения ленты – 600 мм/час). *Оптические наблюдения* выполнены с помощью петрографического микроскопа «POLAM – P-211». Посредством *сканирующей электронной микроскопии* (микроскоп ЛЕО-420, аналитик к.г.-м.н. Титов А.Т.) была проведена диаг-

ностика фаз, определены их морфология, временные соотношения и качественный химический состав. Изучение объектов проводилось на препаратах, напыленных углеродом. Исследование химического состава минералов и стекол выполнено на микроанализаторе JXA-8100 (аналитик к.г.-м.н. Нигматулина Е.Н.). Для анализа изготавливались двусторонние полированные прозрачные шлифы на эпоксидной смоле толщиной 0.04 см. Параметры съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток поглощенных электронов 40 нА, угол отбора 40°, время счета 10 сек на каждой аналитической линии, диаметр зонда 2–3 мкм. Погрешность определений всех компонентов находилась в пределах 2 отн.%. Пределы обнаружения элементов C_{\min} не превышали 0.1–0.2 мас.%.

Продукты обжига сопочной брекчии в газовом факеле

Среди продуктов извержения грязевого вулкана Карabetова гора были обнаружены уникальные породы, метаморфизованные в ходе стремительного нагрева в пламени газового факела (рис. 2). Размер этих глыб варьирует от 10 до 30 см, однако большинство образцов являются кусками более крупных блоков, расколовшихся при ударе о землю. Эти породы обнаружены в виде разрозненных фрагментов в радиусе 30 м от жерла, возникшего при последнем извержении. Все фрагменты имеют зональное строение. Внешняя зона мощностью до 2 см бурая, красноватая или черная, интенсивно ошлакована, характеризуется обилием округлых или овальных закрытых пор (диаметром до 0.5–1 см). По внешнему облику порода в этой зоне более всего напоминает вулканическую пемзу, реже имеет блестящую остеклованную поверхность. Натечные формы или «сосульки», – столь характерные для других пирогенных плавленых пород, – в данном случае редки.

Химический состав пород. Большинство изученных образцов имеют близкий химический состав и соответствуют глинистым породам, составляющим основу выбросов грязевых вулканов Керченско-Таманской провинции (табл. 1). Только один из них (обр. 7) был изначально обогащен карбонатным материалом, на что указывает высокое содержание CaO (34.6 мас.%) и присутствие остаточного CO₂ (0.77 мас.%). В остальных случаях концентрации CaO не превышают 3.8 мас.%. Обожженная сопочная брекчия ха-

Рис. 2. Фрагмент глыбы сопочной брекчии, оплавленный в горящем газовом факеле грязевого вулкана Карabetова гора (извержение 2000 г.). Фото 2008 г.

Глыба остеклована в тонком поверхностном слое мощностью в первые мм, под которым располагается зона ошлакованного материала. Внутренняя часть фрагмента не испытывала плавления, была прогрета только до состояния «красного спека» и сохранила текстурные неоднородности протолита



Таблица 1

Химический состав (мас.%) исходной и обожженной в ходе извержения 2000 г. сопочной брекчии грязевого вулкана Карabetова гора (сборы 2008 г.)

Компонент	Гр-1	3	4	7	12-1	12-5	12-10	12-12
SiO ₂	60.29	62.89	63.45	37.76	62.62	62.73	62.70	63.08
TiO ₂	0.78	0.95	0.98	0.47	0.97	0.96	0.98	0.97
Al ₂ O ₃	12.70	18.15	18.45	12.75	18.80	18.15	18.80	19.20
Fe ₂ O ₃	2.13	1.93	1.99	0.54	1.44	6.58	7.73	3.63
FeO	4.08	6.55	6.60	2.10*	6.68	2.75	1.24	4.83
MnO	0.09	0.11	0.11	4.74	0.10	0.11	0.10	0.09
MgO	1.80	2.42	2.35	2.49	2.49	2.38	2.33	2.29
CaO	1.86	1.50	1.30	34.60	2.10	1.20	1.30	1.20
Na ₂ O	2.98	1.52	1.41	1.25	0.94	0.99	1.28	1.35
K ₂ O	1.79	2.84	2.79	0.90	2.72	2.81	2.78	2.75
P ₂ O ₅	0.16	0.19	0.14	0.20	0.17	0.14	0.13	0.14
H ₂ O ⁻	1.00	0.09	0.11	0.25	0.12	0.21	0.13	0.09
ППП	5.24	0.28	0.20	0.06*	0.64	0.89	0.52	0.43
CO ₂	4.65	0.11	0.11	0.77*	0.22	0.11	0.11	0.11
S _{общ.}	н/об	0.10	0.06	0.81	<0.05	<0.05	н/об	<0.05
Сумма	99.55	99.63	100.05	99.69	100.01	100.01	100.13	100.16

Примечание. Гр-1 – глинистый матрикс исходной сопочной брекчии; 3, 4, 12-1, 12-5, 12-12 – оплавленные силикатные породы; 7 – обожженная карбонатно-силикатная порода; 12-10 – «вспотевшая» плавленая силикатная порода; * – большое содержание MnO и S мешает определению FeO, ППП, CO₂.

Анализы выполнены в Аналитическом центре Института земной коры СО РАН (аналитик Т.В. Бондарева).

рактизуется высокими содержаниями (в мас.%): SiO₂ (около 63), Al₂O₃ (18–19) и K₂O (2.5–2.8), что обусловлено преобладанием мусковит-иллитового материала в протолите. Концентрации (FeO + Fe₂O₃) колеблются от 7 до 9 мас.%. Значительные вариации FeO/Fe₂O₃ указывают на нестабильность редокс условий при обжиге пород. Содержания TiO₂ близки к 1 мас.% и отражают постоянство соотношения глинистой и песчаной фракций в протолите. Марганец в изученных породах является элементом-примесью (около 0.1 мас.% MnO). Концентрации MgO (2.3–2.5 мас.%) умеренные, связан ли этот элемент со смектитовой или карбонатной компонентой протолита, неясно. Факельный обжиг сопочной брекчии привел к частичной дегидратации и декарбонатизации исходного материала. На это указывают остаточные содержания H₂O и CO₂. Содержание натрия в прокаленных породах понижается в 2–3 раза относительно его концентрации в протолите, однако остается необычно высоким для продуктов пирогенного метаморфизма (1.0–1.5 мас.% Na₂O). Эта особенность также объясняется краткостью высокотемпературного воздействия, длительность которого была явно недостаточна для полного улетучивания натрия. В ходе стационарных пирогенных процессов, связанных с горением углей, горючих сланцев и нефти, натрий выгорает из протолита практически целиком [5,6].

Фазовый состав пород. Посредством рентгенофазового анализа 10 образцов было установлено преобладание в их составе рентгеноаморфной фазы (табл. 2). По данным оптических наблюдений, сканирующей электронной микроскопии и микрозондового анализа в зонах наиболее высокотемпера-

Таблица 2

Минеральные ассоциации оплавленной сопочной брекчии грязевого вулкана Карабег-тово гора (по данным оптических наблюдений, рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микронзондового анализа)

Минерал	Образец										
	4	12-1	12-5	12-8	12-10	12-12	3	области			
								1	2	3	4
Стекло	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	+	+	+	+
Тридимит	–	●	–	–	–	●●	●●	+		+	+
Кристобалит	–	●	–	–	–	●?	●				
Клинопироксен	–	–	–	–	–	–	●●	+	+	+	+
Кордиерит	●	●●	–	●●●	–	●	●●●			+	+
Ti-магнетит	●●	●●	–	●	●	●	●●	+	+	+	+
Ильменит	–	–	–	–	–	–	●			+	
Пирит	–	–	–	–	–	–	●		+		+
Муллит	–	–	–	–	●	–	–				
Плагиоклаз	●*	●●	●	–	●*	●*	●●	+	+		
Кварц*	⊗	●●●	●●●	●●	⊗	⊗	●●	+	+	+	+

Примечание. ⊗ – главная фаза; ●●● – распространенный минерал; ●● – редкий минерал; ● – очень редкий минерал; «–» – фаза не диагностирована; * – термически преобразованный плагиоклаз обломочной фракции; + – минералы, диагностированные посредством микронзондового анализа для индивидуальных областей обр. 3 (см. рис. 3).

турного преобразования сопочной брекчии преобладает кислое K-Al стекло. Среди новообразованных кристаллических фаз доминирует тридимит, реже и в меньших количествах обнаруживаются кордиерит и Ti-магнетит. В единичных образцах диагностированы муллит, кристобалит, клинопироксен и основной плагиоклаз. Из минералов протолита обычно сохраняется обломочный кварц и значительно реже – сильно измененный кислый плагиоклаз и пирит.

Структурно-текстурные особенности обожженной сопочной брекчии. Большинство глыб были оплавлены только снаружи. Материал внутренних зон упрочнен, слабо спечен и пропитан тонкодисперсным гематитом (возникшим при разложении исходных соединений железа). Сохранность в горельниках неоднородной текстуры исходной сопочной брекчии, а также полевошпат-кварцевого обломочного материала, преобладание рентгеноаморфной составляющей и отсутствие рефлексов высокотемпературных модификаций SiO₂ позволяют оценить температуру преобразования пород не выше 870°C. Основными процессами на данной стадии термических преобразований являются твердофазовое спекание и перекристаллизация материала при участии пленочных расплавов. Поскольку размер кристаллитов в изученных породах зачастую много меньше 5 мкм, основную информацию об их термической истории можно получить путем анализа размера, количества и конфигурации пор, исходя из аналогии между пирогенными породами и керамикой [4,5]. Сечение типичного образца оплавлен-

ной сопочной брекчии (Обр. № 3) иллюстрирует рис. 3. Овальная конфигурация пор и равномерный характер их распределения во внешней кайме глыбы позволяют утверждать, что на пике термического воздействия материал этой зоны, мощностью 1.0-1.5 см, пребывал в жидкопластичном состоянии. Однако полной унификации структуры плавленной породы и коалесценции пор в данном случае не произошло. В зоне глубже 2 см от поверхности поры имеют сложную конфигурацию и распределены неравномерно. Эти факты указывают на кратковременность процесса термометаморфизма.

Минералогия продуктов факельного обжига сопочной брекчии

Для детального исследования был выбран термически наиболее преобразованный образец № 3 (рис. 3). Посредством оптической и электронной микроскопии, а также микронзондового анализа, была установлена его высокая фазовая гетерогенность. Порода представляет собой агрегат ультрамикрочернистых кристаллитов, погруженных в стекловатый матрикс (рис. 4-8). В этом случае достоверная диагностика фаз оказалась невозможна даже с использованием вышеуказанной техники при увеличениях до $\times 1500$. Поэтому анализ продуктов закалки расплавов, возникших при плавлении сопочной брекчии в газовом факеле, был выполнен для 4 локальных участков (диаметром < 0.5 см), где размер минеральных индивидов достигал 30 мкм (рис. 3). Все эти области располагались на глубине не более 1.5 см от поверхности оплавленной глыбы.

В изученных участках преобладают *кислые силикатные стекла*, состав которых широко варьирует в каждой микрообласти (в

мас. %): SiO_2 – 61.5–86.3; Al_2O_3 – 7.9–23.2; FeO – 1.4–6.1; MgO – 0.2–5.3; CaO – 0.2–1.36; Na_2O – 0.3–2.5; K_2O – 0.1–4.9 (табл. 3; рис. 5, 6). Эти закаленные расплавы фиксируют микрогетерогенности в составе протолита (скопления кварцевых или полевошпатовых зерен; слюд и гидрослюд; карбонатных и фосфатных включений; фаз-концентратов железа).

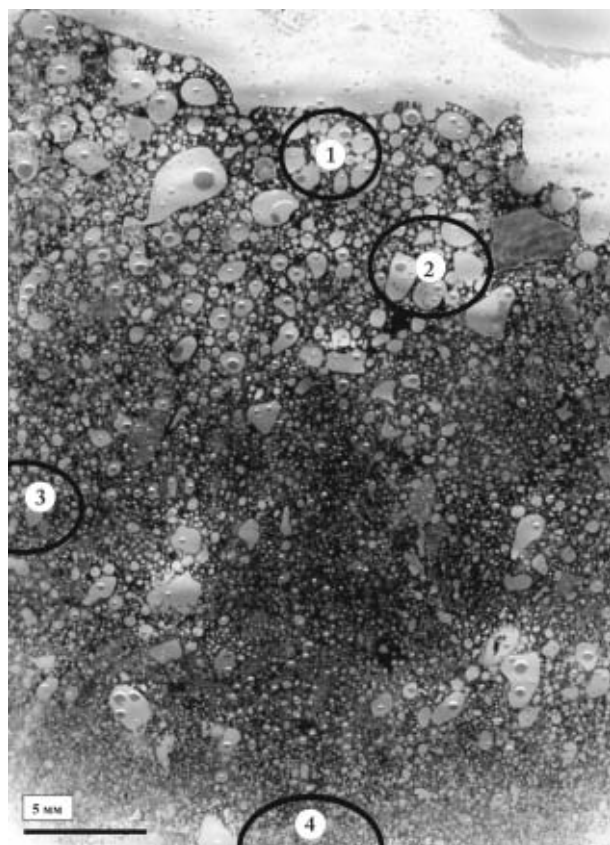


Рис. 3. Конфигурация и характер распределения пор в сечении образца оплавленной сопочной брекчии (Обр. №3). Сканированное изображение шлифа.

1-4 – области развития крупных новообразованных кристаллитов, где были выполнены микронзондовые и СЭМ исследования

Кристаллические фазы достигают размеров, достаточных для получения кондиционных микрозондовых анализов (> 5 мкм), только в отдельных микроучастках (до 1×1 мм), обогащенных Са и/или Fe. Это позволяет предполагать, что вязкость сухих силикатных жидкостей (снижающаяся в присутствии вышеназванных компонентов) играла решающую роль в процессах нуклеации и роста минеральных индивидов. Все изученные области наряду с кислым глиноземистым стеклом содержат недоплавленные кварцевые зерна и новообразованный клинопироксен. В остальном каждая из них отличается своим набором минеральных фаз (см. табл. 2).

Клинопироксен образует плоскогранные кристаллы (размером 5–20 мкм) (рис. 4 б–г) и ксеноморфные зерна. В области 2 пироксены обладают морфологическими особенностями закалочных фаз, образуют пластинчатые и скелетные индивиды и хупер-лайк структуры (рис. 6 б,в). Все клинопироксены являются глиноземистыми пижонитами и авгитами. Их составы значительно варьируют даже в пределах одной микрообласти (табл. 4). Отличительной особенностью является необычно высокое содержание марганца (до 7.4 мас.% MnO). Кристаллы клинопироксенов обладают ярко выраженной ростовой зональностью (рис. 4 б,в). От центра к краю содержание FeO возрастает

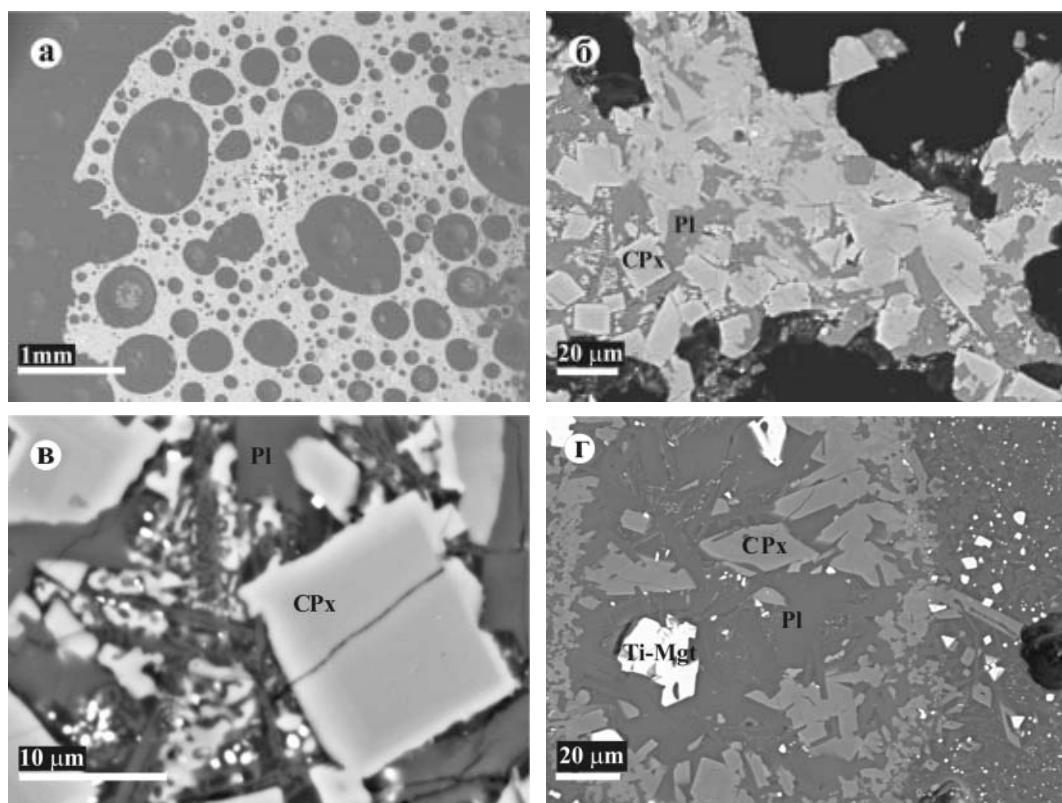


Рис. 4. Структура и фазовый состав тонкой корки силикатной плавленной породы, возникшей при закалке расплава на поверхности глыбы (область 1 на рис. 3). Изображение в обратнорассеянных электронах. СЭМ LEO-1430 VP. а – размер и конфигурация пор; б – новообразованный клинопироксен–плаггиоклазовый агрегат; в – зональный клинопироксен, плаггиоклаз и «симплектиты» в интерстициях (увеличенный фрагмент рисунка (б)); г – агрегат скелетных кристаллов клинопироксена, плаггиоклаза и Ti-магнетита

тает от 10.6 до 24.8 мас.%, что компенсируется падением концентрации СаО с 17.7 до 5.7 мас.% при постоянном содержании MgO (11–12 мас.%).

Плагиоклазы приурочены непосредственно к внешней поверхности оплавления сопочной брекчии (рис. 4 б-г; 6 б,в). Составы их варьируют от андезина (№ 45) до лабрадора-битовнита (№ 61-89). Содержание K₂O достигает 1.6 мас.% и сопоставимо с таковым FeO (до 1.4 мас.%) (табл. 4).

Кордиерит развит локально, приурочен к стенкам газовых пузырей (рис. 7). Он обладает промежуточной железистостью ($f = 26-45\%$) (табл. 5) и наряду с клинопироксеном является главной фазой-концентратором магния, кристаллизуясь, в отличие от него, из микрообъемов глиноземистого расплава. Появление кордиерита заметно снижает концентрации Al, Mg и Fe в сосуществующем с ним стекле.

Рудные минералы. Новообразованные рудные минералы в оплавленной сопочной брекчии представляют собой оксиды Fe²⁺ и Fe³⁺ – **титаномагнетит** и твердые растворы серии **магнетит-магнезиоферрит**, а также **ильменит** (рис. 4–7). Тонкая эмульсия этих рудных фаз сосредоточена во внешней термически наиболее преобразованной зоне и развита на глубину до 1.5 см от поверхности глыбы. Скопления рудных минералов обычно приурочены к периферии пор (рис. 5б; 6а,в) и к тонким перемычкам между ними, что обычно для пирогенных плавленых пород, железорудного агломерата и металлургических шлаков и объясняется особенностями газовой продувки расплавов. Газовая фаза с участием остаточного кислорода вызывает процессы окисления Fe²⁺ и последующую ферритизацию расплава [1]. Его вязкость резко возрастает, что способствует практически мгновенному затвердеванию с появлением скелетных и/или дендритных индивидов и стеклованием остаточного расплава (рис. 4; 6в).

На глубине около 2.5 см от оплавленной поверхности глыбы в матрице преобразованной сопочной брекчии наряду с недоплавленными кварцевыми зернами сохраняются многочисленные округлые выделения **пирита** (обл. 4, рис. 8). Вероятнее всего, этот минерал, широко распространенный в сопочных брекчиях Керченско-Таманской провинции [12], не является новообразованным, а унаследован от протолита. Таким образом, распределение рудных минералов в изученной породе указывает на высокоградиентные условия, существовавшие при факельном обжиге. Новообразованные оксиды, содержащие Fe³⁺, кристаллизуются только в зоне оплавления глыбы. Под этой коркой на глубине более 1.5 см температура прогрева протолита и кислородные потенциал газовой фазы резко снижались, что доказывалось сохранностью первичного пирита.

Полиморфные модификации SiO₂. Поскольку кварцевые песчинки являются обычной составляющей исходной сопочной брекчии, они в изобилии встречаются и в продуктах ее обжига. Количество неконтаминированных расплавом кварцевых зерен растет по направлению от поверхности к центру оплавленной глыбы. В зоне валового плавления протолита сохраняются только отдельные реликты недоплавленных кварцевых зерен размером от 20 до 50 мкм (рис. 5а; 7), окруженные каймами высококремниевых стекол (табл. 3). На глубине 2.5 см от поверхности глыбы (рис. 8) количество кварцевого материала уже достигает 20 об.%, а размер его сохранив-

Таблица 3
Химический состав (мас. %) кварца, тридимита и кислых стекол из плавленной силикатной породы грязевого вулкана Карabetова гора

Обр. № 3	Область 1										Область 3									
	Qu			Trd			Gl				Qu			Trd			Gl			
Фаза	3-9	3-72	3-2	3-6	3-73	3-10	3-11	3-1	3-5	3-19	3-34	3-46	3-35	3-47	3-18	3-24	3-25	3-26	3-28	3-38
Компонент	99.53	99.81	94.20	95.94	94.25	61.54	62.67	68.85	80.31	99.35	99.22	99.94	96.46	94.35	72.98	73.72	72.09	75.66	84.45	86.27
SiO ₂	0.01	0.02	0.24	0.12	0.22	0.32	0.54	0.87	0.51	0.03	0.01	0.02	0.30	0.41	0.04	0.43	0.51	0.82	0.79	0.38
TiO ₂	0.12	0.08	2.66	2.32	3.43	23.18	21.00	15.57	10.45	0.47	0.20	0.11	1.91	2.32	15.71	14.88	16.37	14.13	7.90	8.72
FeO	0.18	0.14	1.25	0.82	0.24	5.25	6.10	5.03	3.63	0.20	0.27	0.17	0.39	1.33	2.85	2.60	3.27	2.26	1.39	2.22
MnO	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.09	0.11	0.07	0.05	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.06	0.06	0.09	0.04	0.03	0.03
MgO	0.00	0.00	0.11	0.40	0.05	5.30	4.06	1.44	1.96	0.00	0.00	0.00	0.25	0.27	0.51	0.45	0.63	0.52	0.22	1.88
CaO	0.05	0.06	0.32	0.09	1.21	0.27	0.55	0.85	0.19	0.04	0.02	0.03	0.12	0.18	1.07	1.36	1.00	0.84	0.71	0.28
Na ₂ O	0.03	0.00	0.28	0.30	0.51	0.61	0.79	2.46	0.34	0.00	0.02	0.00	0.31	0.37	1.42	1.21	1.22	1.08	1.07	0.30
K ₂ O	0.03	0.01	0.66	0.10	0.03	3.14	3.47	3.66	0.18	0.11	0.01	0.04	0.16	0.05	4.69	4.85	4.50	4.65	2.93	0.09
P ₂ O ₅	0.01	0.00	0.08	0.10	0.00	0.26	0.34	0.10	0.51	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02	0.04	0.07	0.03	0.03	0.07	0.06
Сумма	99.96	100.11	99.81	100.20	99.94	99.96	99.62	98.90	98.14	100.22	99.76	100.30	99.96	99.30	99.37	99.62	99.70	100.04	99.54	100.22
	Расчет формулы на 2 атома кислорода										Расчет формулы на 2 атома кислорода									
Si	1.00	1.00	0.96	0.97	0.96					0.99	1.00	1.00	0.97	0.97						
Al	0.00	0.00	0.03	0.03	0.04					0.01	0.00	0.00	0.02	0.03						
Fe	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00					0.00	0.00	0.00	0.00	0.01						
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
Na	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						

Примечание. Qu – кварц; Trd – тридимит, Gl – стекло.

Таблица 4
Химический состав (мас.%) пироксенов и плагиоклазов из плавленной силикатной породы грязевого вулкана Карабетова гора

Минерал	Клинопироксены							Плагиоклаз							
	3-56	3-57	3-58	3-60	3-67 центр	3-68 край 1	3-69 край 2	3-74	Компонент	3-61	3-63	3-64	3-70	3-71	3-76
SiO ₂	51.31	50.70	50.16	51.76	51.70	51.28	50.84	51.00	SiO ₂	61.97	53.94	54.18	51.50	55.29	50.81
TiO ₂	0.31	0.32	0.30	0.20	0.38	0.33	0.38	0.40	TiO ₂	0.26	0.11	0.14	0.09	0.20	0.04
Al ₂ O ₃	4.00	3.89	6.37	1.85	2.38	2.08	1.23	1.93	Al ₂ O ₃	23.43	28.96	28.96	30.33	26.86	30.31
FeO	18.15	18.86	18.70	19.68	10.60	24.27	24.78	22.28	FeO	0.89	0.45	0.47	1.40	1.21	1.31
MnO	7.40	6.83	6.52	5.92	5.33	5.05	5.03	0.33	MnO	0.21	0.18	0.16	0.14	0.08	0.01
MgO	14.78	16.13	12.39	17.53	11.90	11.07	12.27	17.56	MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
CaO	4.52	3.58	5.62	3.55	17.67	6.23	5.70	7.02	CaO	7.36	11.73	11.79	15.04	13.22	14.84
Na ₂ O	0.16	0.08	0.18	0.09	0.16	0.18	0.00	0.04	Na ₂ O	4.01	4.05	3.98	0.92	2.65	2.56
K ₂ O	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	K ₂ O	1.59	0.33	0.34	0.08	0.17	0.15
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	P ₂ O ₅	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
Сумма	100.66	100.40	100.29	100.60	100.13	100.50	100.23	100.59	Сумма	99.77	99.74	100.01	99.50	99.71	100.07
	Расчет формулы на 6 атомов кислорода							Расчет формулы на 8 атомов кислорода							
Si	1.96	1.93	1.93	1.96	1.97	2.01	1.99	1.92	Si	2.76	2.45	2.45	2.35	2.51	2.32
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	Al	1.23	1.55	1.54	1.63	1.44	1.63
Al	0.18	0.17	0.29	0.08	0.11	0.10	0.06	0.09	Fe	0.03	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05
Fe	0.58	0.60	0.60	0.62	0.34	0.80	0.81	0.70	Ca	0.35	0.57	0.57	0.74	0.64	0.73
Mn	0.24	0.22	0.21	0.19	0.17	0.17	0.17	0.01	Na	0.35	0.36	0.35	0.08	0.23	0.23
Mg	0.84	0.91	0.71	0.99	0.67	0.65	0.72	0.99	K	0.09	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01
Ca	0.18	0.15	0.23	0.14	0.72	0.26	0.24	0.28	P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00							
Mg#	0.59	0.60	0.54	0.61	0.67	0.45	0.47	0.58							
	Миналы														
Ca ₃ Si ₃ O ₉	10.02	7.76	13.19	7.40	37.83	13.98	12.36	14.30	NaAlSi ₃ O ₈	43.99	37.69	37.12	9.91	26.29	23.55
Mg ₂ Si ₂ O ₆	45.59	48.63	40.46	50.82	35.45	34.57	37.05	49.76	KAlSi ₃ O ₈	11.47	2.02	2.09	0.53	1.14	0.89
Fe ₂ Si ₂ O ₆	44.39	43.61	46.35	41.78	26.72	51.46	50.59	35.94	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	44.55	60.29	60.79	89.56	72.58	75.56

Примечание. Mg# = Mg/(Mg+Fe), ф.е.

Анализы выполнены для области 1 обр. № 3.125

Таблица 5

Химический состав (мас.%) кордиеритов из плавленной силикатной породы грязевого вулкана Карабегова гора

Компонент	Область 3																
	3-29	3-30	3-31	3-32	3-33	3-37	3-39	3-40	3-43	3-44	3-45	3-48	3-54	3-55			
SiO ₂	50.25	51.00	50.60	50.97	52.12	50.70	49.77	50.59	50.40	50.82	54.41	50.85	48.98	49.94			
TiO ₂	0.11	0.12	0.16	0.16	0.31	0.16	0.16	0.20	0.18	0.15	0.33	0.24	0.18	0.17			
Al ₂ O ₃	32.17	31.28	30.73	31.25	30.46	31.67	32.79	32.20	32.48	31.99	29.35	31.85	32.53	32.59			
FeO	8.08	6.47	6.96	7.49	7.79	6.98	7.16	7.24	6.73	7.07	7.34	7.86	9.44	10.28			
MnO	0.16	0.13	0.13	0.13	0.17	0.14	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17			
MgO	9.22	10.41	10.15	9.31	9.40	9.87	10.13	9.35	10.07	9.69	8.48	9.22	8.34	6.96			
CaO	0.06	0.05	0.14	0.06	0.07	0.10	0.06	0.19	0.05	0.07	0.11	0.16	0.07	0.09			
Na ₂ O	0.06	0.09	0.06	0.11	0.07	0.03	0.07	0.08	0.05	0.04	0.08	0.11	0.06	0.12			
K ₂ O	0.29	0.22	0.25	0.23	0.16	0.36	0.20	0.49	0.26	0.23	0.24	0.34	0.20	0.24			
P ₂ O ₅	0.03	0.09	0.08	0.09	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.01	0.12	0.16	0.18	0.13			
Сумма	100.43	99.87	99.27	99.80	100.61	100.07	100.51	100.50	100.40	100.17	100.57	100.91	100.13	100.68			

Расчет формулы на 18 атомов кислорода																
Si	5.07	5.13	5.13	5.15	5.22	5.10	5.00	5.08	5.05	5.11	5.42	5.10	4.99	5.06		
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01		
Al	3.82	3.71	3.68	3.72	3.60	3.76	3.88	3.81	3.84	3.79	3.45	3.76	3.90	3.90		
Fe	0.68	0.54	0.59	0.63	0.65	0.59	0.60	0.61	0.56	0.59	0.61	0.66	0.80	0.87		
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
Mg	1.39	1.56	1.54	1.40	1.41	1.48	1.52	1.40	1.50	1.45	1.26	1.38	1.26	1.05		
Ca	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01		
Na	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02		
K	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03		
f, %	33.2	26.1	28.0	31.4	31.9	28.8	28.6	30.7	27.5	29.3	33.0	32.7	39.1	45.6		

Примечание. $f = 100 * (Fe + Mn) / (Fe + Mn + Mg)$, ф.е.

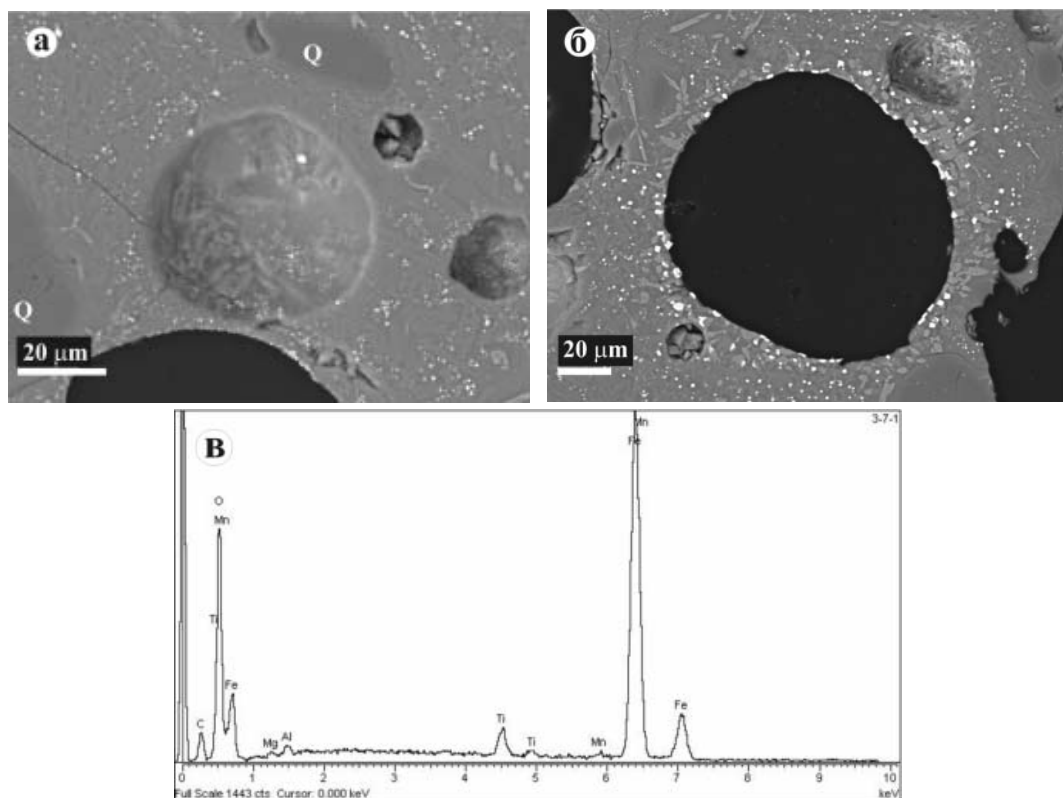


Рис. 5. Особенности раскристаллизации силикатного расплава на глубине ~ 100 мкм от внешней оплавленной поверхности глыбы сопочной брекчии. Изображение в обратнорассеянных электронах (СЭМ LEO-1430 VP): а – стенка газового пузыря, силикатный расплав закален в кислое Al-K стекло с частичной раскристаллизацией в клинопироксен–плаггиоклазовый агрегат; б – газовый пузырь с каймой из титаномангнетита, клинопироксена и плаггиоклаза; в – ЭДС-спектр новообразованного титаномангнетита

шихся частиц уменьшается до 2 мкм. Таким образом, активное вовлечение терригенного кварцевого материала в процессы плавления происходило только в тонком внешнем слое расплава. В более глубоких зонах термического воздействия кварцевый песок не был целиком контаминирован.

Тридимит широко распространен в оплавленной породе. Он является ранней фазой, поскольку захватывается в виде включений кристаллами кордиерита (рис. 7). Минерал отличается от кварца по морфологии индивидов (пластины, достигающие в длину 30 мкм), по свечению в пучке зонда (лиловое, вместо оранжевого у кварца) и по химическому составу (см. табл. 3). Как и большинство пирогенных тридимитов, изученный нами тридимит обогащен Al, Ti, Fe и Mg. Составы наиболее «грязных» тридимитов (SiO_2 94 мас.%) и высококремниевых стекол (SiO_2 до 86 мас.%) сближены и демонстрируют сходные тенденции обогащения Al, Fe, Mg при низких концентрациях Na, K и P (табл. 3).

Кристобалит установлен посредством рентгенофазового анализа в валовой пробе изученной породы, однако судить о характере его распределения в образце не представляется возможным. Традиционно при реконструкциях режима образования пирогенных пород кристобалит не используется как индикатор сверхвысокой (> 1400°C) температуры, поскольку он регу-

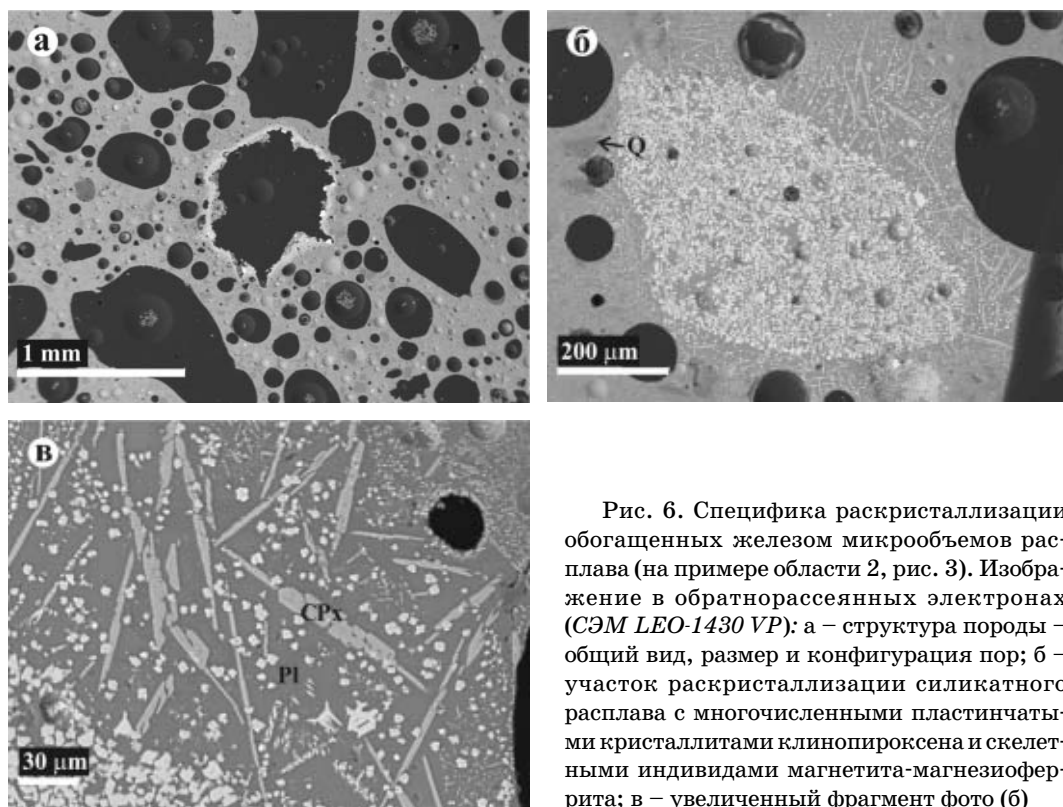


Рис. 6. Специфика раскристаллизации обогащенных железом микрообъемов расплава (на примере области 2, рис. 3). Изображение в обратнорассеянных электронах (СЭМ LEO-1430 VP): а – структура породы – общий вид, размер и конфигурация пор; б – участок раскристаллизации силикатного расплава с многочисленными пластинчатыми кристаллитами клинопироксена и скелетными индивидами магнетита-магнезиоферрита; в – увеличенный фрагмент фото (б)

лярно присутствует в метапелитовых пирогенных породах, возникших при $T < 1250^{\circ}\text{C}$, т.е. является метастабильным [5,16]. Однако, именно в продуктах факельного обжига пелитовых осадков могло иметь место образование кристобалита в поле его стабильности.

Обсуждение результатов

Интерпретация сценария извержения. Причины воспламенения газовых струй при извержении грязевых вулканов до сих пор не ясны. Среди них обычно называют следующие: возгорание от внешнего источника (искра от соударения фрагментов твердых пород); детонация ацетилена и/или водорода; разность электрических потенциалов, возникающая на высоте нескольких сот метров между положительно заряженной атмосферой и отрицательно заряженной массой газов и пр. Вероятность реализации этих сценариев существует, но крайне низка, поскольку требует совпадения во времени и пространстве нескольких нерядовых параметров. Вместе с тем, статистика извержений свидетельствует, что в определенных районах «огненные явления» возникают регулярно [3,11–13,15,18]. Например, в Таманской провинции за последние 190 лет каждое шестое извержение сопровождалось воспламенением газов. Анализ данных об извержениях грязевых вулканов Керченско-Таманской и Прикаспийской провинций позволяет выделить две наиболее часто повторяющиеся последовательности событий.

I. Подземный гул (колебания почвы) – выход газов из трещин – взрыв – мощный газовый выброс – появление газового столба – его локальное воспламенение в атмосфере (или взрыв в атмосфере, сопровождающийся

воспламенением) – распространение (опускание) пламени на весь газовый столб.

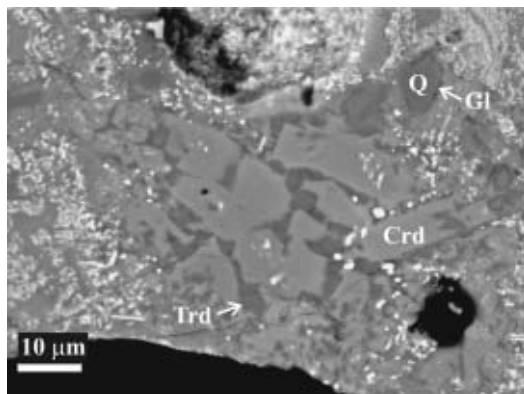
II. Гул – взрыв – толчок – появление столба дыма – появление столба пламени.

Извержение грязевого вулкана Карabetова гора в мае 2000 года произошло по первому сценарию, который может быть проинтерпретирован с позиций физики горения и взрыва. Извержению всегда предшествует значительный рост газового давления в близповерхностных резервуарах. Первым откликом на него является усиление площадной и/или струйной газовой эмиссии, которая не всегда эффективно снижает избыточное давление. Часто снятие напряжения происходит в результате взрыва и последующего извержения, начинающегося с выброса мощной газовой струи. Взрыв создает проходящую сквозь выброшенный в атмосферу газовый столб ударную волну. На ее фронте происходит адиабатическое сжатие газа, сопровождающееся его значительным разогревом (температурный скачок), а в тылу фронта ударной волны возникает зона разрежения и охлаждения. Возникновение такой волны в горючей смеси приводит к ее немедленному самовоспламенению даже в отсутствии посторонних источников зажигания [2, 9]. В более редких сценариях извержений детонировать способен уже горящий факел. В этом случае детонация развивается из нормального горения вследствие увеличения поверхности фронта пламени и/или его распространения на весь объем горючей смеси.

Пределы горючести газов, присутствующих в выбросах грязевых вулканов, в смеси с воздухом при 1 атм. и 0°С составляют (в %): метан – 5.0–15.0; водород – 4.0–74.2; ацетилен – 2.5–80.0; СО – 12.5–74.2. Всякий предварительный прогрев смеси расширяет границы ее горючести [2]. Поскольку газовые выбросы грязевых вулканов по существу являются метановыми (90-99 % CH_4) [3,12,17], именно его смешение с воздухом (разбавление газового столба) и будет в подавляющем большинстве случаев формировать самовоспламеняющиеся горючие смеси.

В сценарии (I) возгорание газового столба происходит с задержкой – он не воспламеняется ни в момент подземной детонации газа, ни в момент первого контакта с воздухом. В общем случае время задержки возгорания зависит от мощности взрывной волны (лимитирующей скорость генерации активных центров) и скорости образования горючей смеси [2]. «Огненным» извержениям всегда предшествует возникновение мощной взрывной волны. Поэтому время задержки воспламенения в данном случае лимитируется скоростью образования го-

Рис. 7. Специфика раскристаллизации высокоглиноземистых, обогащенных железом и магнием микрообъемов расплава (на примере области 3, рис. 3). Агрегат кордиерита, тридимита и рудных фаз, ассоциирующих с неассимилированными зернами кварца обломочной фракции. Изображение в обратнорассеянных электронах (СЭМ LEO-1430 VP)



рючей смеси. Наибольшая вероятность самовозгорания существует в той зоне газового столба, где к моменту прохождения фронта адиабатического сжатия и разогрева газа уже возникла метаново-воздушная смесь, разбавленная до пределов горючести. И наоборот – самопроизвольному воспламенению газового столба будут препятствовать: (I) малая мощность ударной волны, не обеспечивающая разогрева газа до температуры самовоспламенения, и (II) медленное смесеобразование, отстающее от движения фронта адиабатического сжатия и разогрева газа.

Термический режим обжига сопочной брекчии в газовом факеле.

Анализ оплавленной сопочной брекчии из продуктов извержения грязевого вулкана Карabetова гора впервые позволил установить петрогенетические особенности пород, подвергшихся обжигу в газовом факеле. Фазовая и текстурная зональность этих пород – следствие чрезвычайно высоких термических градиентов. Валовое плавление обезвоженного пелитового протолита (иногда с образованием структур течения) имело место только на поверхности глыб – в зоне мощностью не более нескольких мм. Плавление карбонато-глинистого матрикса с сохранением значительной доли обломочного кварца происходило на глубине до 1.5 см. На глубине 2.5 см текстурный рисунок первичной сопочной брекчии сохраняется даже в наиболее преобразованном образце № 3 (рис. 8). Это указывает на преимущественно твердофазовый характер термических изменений породы вне зоны ее прямого контакта с тепловым источником. Появление железистых шпинелидов в оплавленной внешней зоне и сохранность пирита на глубине 2.5 см указывает на высокие градиенты потенциала кислорода, существовавшие при термометаморфизме.

Отличительной особенностью пирометаморфических продуктов извержения грязевого вулкана Карabetова гора является их исключительно высокая гетерогенность. Ее показателями являются: (I) различия фазового состава смежных микроучастков (0.3x0.3 мм); (II) сосуществование стекол контрастных составов; (III) широкий разброс составов новообразованных

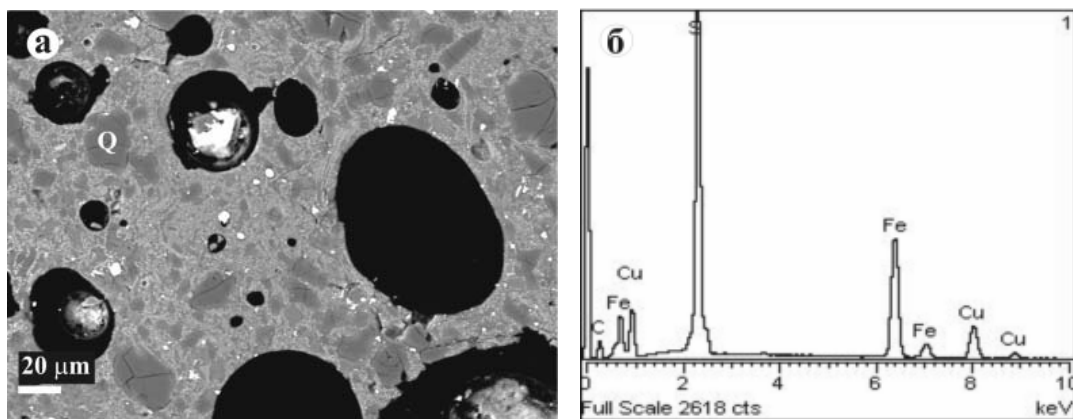


Рис. 8. Консервация первичной структуры сопочной брекчии, обломочного кварца и аутигенного пирита в процессе преимущественно твердофазовых термических преобразований: а – изображение в обратнорассеянных электронах (СЭМ LEO-1430 VP) (на примере области 4, рис. 3); б – ЭДС-спектр пирита

минералов. Таким образом, в горящем факеле каждый микрообъем породы плавился индивидуально в условиях резкого перегрева относительно равновесия. Унификация составов пирогенных расплавов не достигалась в силу совместного действия двух факторов – высокой вязкости сухих силикатных вышлавков и краткости термического воздействия. Такие расплавы, по сути, являются «слепком», запечатлевшим микрофлуктуации фазового состава дегидратированного и декарбонатизированного протолита.

Точно оценить длительность контакта породы с горящим газовым факелом не представляется возможным. Глыба находилась в факеле от момента взрыва, выброса породной массы и его воспламенения до момента падения на землю. Можно предполагать, что время обжига глыб сопочной брекчии непосредственно в факеле не превышало нескольких минут. Согласно наблюдениям И.Н. Гусакова, остывание глыб длилось менее 4 часов. Охлаждение внешней расплавленной корки должно было происходить в режиме закалки на воздухе, тогда как охлаждение внутренних частей глыбы под внешним теплоизолирующим слоем могло длиться несколько часов. Таким образом, обжиг и плавление пород в горящем газовом факеле фактически происходили в режиме термоудара. Этот режим характеризуется одноразовым высокоскоростным и неоднородным повышением температуры, которое создает в образце высокие термические градиенты. В технике режиму термоудара соответствует прогрев материалов со скоростью, достигающей $103^{\circ}\text{C}/\text{сек}$. В этом режиме металлы и сплавы, обладающие высокой теплопроводностью и пластичностью, испытывают ограниченные пластические деформации и незначительное изменение формы. Материалы с низкой теплопроводностью – огнеупоры, керамика и стекла, близкие по физико-химическим характеристикам к изученным породам, трескаются и разрушаются. Отсутствие следов хрупких деформаций в изученных образцах, их валовое плавление в приповерхностном слое и очаговое – на глубине до 2.5 см заставляет предполагать еще более высокую скорость подъема температуры и прогрев до температур, превышающих технологические параметры термоудара ($T_{\text{max}} = 1100\text{--}1200^{\circ}\text{C}$). Поэтому оценки температур теплоносителя и/или термометаморфизма на основании традиционных минеральных реперов или равновесий в данном случае представляются некорректными. Яркое белое свечение пламени, сопровождавшее извержение Карабетовой горы в 2000 году, отвечает $T > 1400^{\circ}\text{C}$. Расчетная температура горения метана в воздухе значительно выше – 2500°C . Однако реальную температуру факела наряду с теплопотерями существенно ограничивает преобладание в воздухе балластного азота, который требует на свой нагрев значительного количества тепла, выделяемого при окислительных реакциях [2]. В качестве верхнего температурного рубежа преобразования пород предлагается принять максимальную температуру воздушного горения метана – $1500\text{--}1800^{\circ}\text{C}$ [2].

Благодарности. Авторы благодарят к.г.-м.н. Н.А. Маслакова за участие в полевых работах. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-05-90405_укр и 09-05-00285а).

1. Калугин И.А., Третьяков Г.А., Бобров В.А. Железородные базальты в горелых породах Восточного Казахстана. Новосибирск: Наука, 1991, 80 с.
2. Кнорре Г.Ф. Что такое горение? М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955, 223 с.

3. Ковалевский С.А. Грязевые вулканы южного Прикаспия (Азербайджана и Туркмении). Баку: Азгостоптехиздат, 1940, 200 с.
4. Перепелицын В.А. Основы технической минералогии и петрографии. М.: Недра, 1987, 255 с.
5. Пирогенный метаморфизм / Э.В. Сокол, Н.В. Максимова, Е.Н. Нигматулина, В.В. Шарыгин, В.М. Калугин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005, 284 с.
6. Потапов С.С. Тенгизит – техногенное стекло // Уральский минералогический сборник, № 3, 1994, с. 174-179.
7. Собисевич А.Л., Горбатилов А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // Доклады РАН. 2008. – т. 422 (4), – С. 542-546.
8. Сокол Э.В., Новиков И.С., Затеева С.Н., Шарыгин В.В., Ванник Е. Пирометаморфические породы спуррит-мервинитовой фации как индикаторы зон разгрузки залежей углеводородов (на примере формации Хатрурим, Израиль) // Доклады РАН, – 2008, – т. 420 (1). – С. 104-110.
9. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М. Изд-во МГУ, 1957. – 442 с.
10. Шнюков Е.Ф., Слипченко Б.В., Кутный В.А. Продукты обжига сопочных брекчий (на примере грязевых вулканов Азербайджана). В кн.: Осадочные породы и руды. Киев: Наук. Думка, 1978. – С. 105–119.
11. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гратенко Г.И. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области. Киев: Наук. Думка, 1986. – 148 с.
12. Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: ГлавМедиа, 2005. – 176 с.
13. Якубов А.А. Грязевые вулканы западной части Апшеронского полуострова и их связь с нефтеносностью. Баку: Изд-во АзФАН, 1941. – 102 с.
14. Якубов А.А., Али-Заде А.А., Зейналов М.М. Грязевые вулканы Азербайджанской ССР. Баку, 1971. – 256 с.
15. Якубов А.А., Али-Заде А.А., Рахманов Р.Р., Мамедов Ю.Г. Каталог зафиксированных извержений грязевых вулканов Азербайджана (за период 1810-1974 гг.). Баку, 1974. – 33 с.
16. Cosca M.A., Essene E.J., Geissman J.W., Simmons W.B., Coates D.A. Pyrometamorphic rocks associated with naturally burnt coal beds, Powder River Basin, Wyoming // Amer. Miner. 1989. – V.74. – P. 85-100.
17. Kopf A.J. Significance of mud volcanism // Reviews of Geophysics, 2002. – v.40(2). – P. 1005-1012.
18. McLintock W.F.P. On the metamorphism produced by the combustion of hydrocarbons in the Tertiary sediments of south-west Persia // Min. Mag., 1932. – v.23. – P. 207-227.
19. Planke S., Svensen H., Hovland M., Banks D.A. & Jamtveit B. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan. Geo-Marine Letters, 2003. – V.23. – P. 258-268.
20. Vapnik Ye., Sharygin V., Sokol E. & Shagam R. Paralavas in a combustion metamorphic complex, Hatrurim Basin, Israel. In: Stracher, G. B. (ed.) GSA Reviews in Engineering Geology XVIII: Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World. Colorado: Boulder, 2007. – P. 133-153.

Наведено результати комплексного дослідження хімічного та фазового складу вихідної та обпаленої в режимі термоудару сопкової брекчії.

Geological, chemical and petrological data characterized unaltered and both annealed and fused mud breccia from Karabetova Mountain mud volcano have been presented.