

Э. В. Сокол, Е. Н. Нигматулина, А. Э. Френкель

**ПАРАБАЗАЛТЫ ИЗ ГОРЕЛЫХ ТЕРРИКОНОВ
ЧЕЛЯБИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА
Часть II: генезис**

E. V. Sokol, E. N. Nigmatulina, A. E. Frenkel

**PARABASALTS FROM THE BURNED SPOIL-HEAPS
OF CHELYABINSK COALBASIN
Part II: origin**

Optical and electron microprobe analysis of three varieties of parabasalts show almost identical mineralogy. The parabasalts are strongly depleted in Na, K, and Si, and enriched in Fe, Ca, Al relative to terrestrial basalts. Basaltic rocks are viewed as hybrid melts. The mineral assemblages indicates a relatively slow cooling from a low-viscosity melts from which hercynite, calcic plagioclase and different clinopyroxenes have previously settled; Fe-olivine, titanomagnetite, pyrrhotine, fluor-apatite are late. The most late-stage mesostasis in a basalt rocks contains fayalite (sometimes with kirschsteinite), K-feldspar (or leucite, or K-Al-Si glasses). Temperature from 1200° to 1000 °C, low confining pressure and low oxygen fugacity were the parameters of parabasalts formation.

Источник базитовых расплавов

Прямые наблюдения соотношений фрагментов пород в зонах плавления внутри терриконов позволили Б. В. Чеснокову высказать предположение, что источником расплава была сильно измельченная легкоплавкая смесь аргиллитов, глинисто-карбонатных пород и сидеритов [7]. Независимо и на другом объекте — природных горельниках Восточного Казахстана — И. А. Калугин с соавторами [1] реконструировал этот же источник высокожелезистых силикатных расплавов. Основные участки генерации парабазальтов в ходе естественных угольных пожаров совпали с участками развития сидеритов. Это явление связано с ранней диссоциацией сидерита и достаточно низкотемпературными условиями плавления сильно восстановительных железистых систем. Появление первой, существенно железистой жидко-

сти в зонах газовой продувки следует ожидать уже при 900 °С, а полного плавления парабазальтов при 1000—1100 °С [1].

Морфология тел парабазальтов (дайки, натечные формы) (рис. 1), их массивная текстура, присутствие пирротина, находки в них самородного железа, ольдгамита, шунгитоподобного вещества позволяют с уверенностью говорить, что их формирование произошло в восстановительной обстановке.

Сидериты явились поставщиками в расплав Fe, Mn, P; карбонатно-глинистые породы — Si, Al, Mg, Ca, аргиллиты — Si, Al, K, Ti. Специфика подвергающегося плавлению субстрата, определившая высокие содержания FeO, Al₂O₃ и CaO на фоне пониженных концентраций MgO и Na₂O, восстановительный режим обжига, низкое общее давление в системе и, как следствие, направления минералообразования, более всего роднят парабазальты горелых пород с промежуточными продуктами металлургического передела железных руд — агломератами, что позволило нам при реконструкции механизма появления расплавов в горелых породах опираться на соответствующие данные, изложенные в монографии Т. Я. Малышевой [5].

В основе всех технологических процессов преобразования железорудного сырья лежат реакции минералообразования в системе Fe–O. Основными минералообразующими компонентами будущего агломерата являются Fe, Mn (руда); Si, Al, K, Na, Ti,

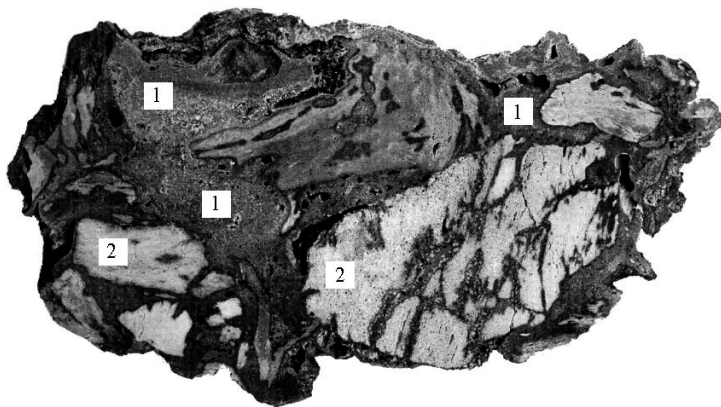


Рис. 1. Прожилковый парабазальт (1), цементирующий фрагменты прокаленных аргиллитов (2).

Шлифованная пластина. Ув. 0.5. Фото Е. Д. Бендера

примесь силикатных пород в рудном концентрате); Ca, Mg (флюсы). Газовый режим термообработки ответственен за нахождение железа в двух- или трехвалентной форме, что оказывает решающее влияние на фазообразование в системе и способствует концентрированию значительных количеств железа в силикатных расплавах, возникших в восстановительных обстановках.

Т. Я. Малышевой [5] показано, что в реакциях образования высокожелезистых Si-Al расплавов задействованы такие реакционноспособные и, следовательно, короткоживущие соединения, как FeO (вюстит) — продукт термической диссоциации сидеритов при восстановительном обжиге $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$; CaO (известь), MgO (периклаз) — продукты термического разложения кальцита и доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2 \uparrow$; аморфные оксиды SiO_2 и Al_2O_3 — продукты термодеструкции слоистых силикатов глинистых пород. На поздних стадиях процесса источником расплава могут также выступать разнообразные ферриты Ca, Mg, Si и Al.

Особое место в этой системе принадлежит вюститу, который одновременно способен играть роль силикатообразующего (восстановительный обжиг) и рудообразующего (более окислительный режим) компонента. Именно двойственность его поведения и объясняет особую важность окислительно-восстановительного режима при определении направления эволюции минерального состава железистых парабазалтов. Поведение прочих элементов также зависит от температуры и газового режима термообработки. Так Al, Mg и Mn способны входить в состав железорудных минералов (гематит, магнетит, вюстит), либо быть источниками феррито- или силикатообразования при восстановительной тепловой обработке, Ca также способен выступать как феррито- и силикатообразователь.

Появлению низкотемпературных высокожелезистых расплавов в отвалах предшествовали процессы термодеструкции основных минералов отвальной массы: аморфизация глин и слюд; разложение Ca-Mg карбонатов; диссоциация сидеритов. По нашим данным, существенное разложение слоистых силикатов аргиллитов фиксируется уже на стадии желтого горельника ($T^\circ = 600\text{—}700^\circ\text{C}$), при повышении температуры обжига в них появляется Al-K-Si стекло. Продукты термической диссоциации карбонатов — известь (а также продукты ее позднейшей гидратации — поргландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и взаимодействия с сернистыми газами — ангидрит CaSO_4), периклаз и черная пена гематит-магнетитового состава — заряженные составляющие красного горельника ($T = 700\text{—}800^\circ\text{C}$). Еще раз отметим, что плавлению

подвергается в первую очередь мелкообломочная фракция горельников, где соответствующие процессы дополнительно инициированы дисперсностью вещества.

Мы поставили своей целью найти прямые доказательства участия вышеперечисленных соединений, а также ферритных фаз в процессах формирования базитовых расплавов в терриконах. С этой целью были детально исследованы глыбы спека (террикон ш. 42), содержащие прожилковые парабазальты. Обнаружены неповрежденные и неокисленные реакционные зоны на контакте базальтов с фрагментами окаменелого дерева доломит-анкеритового состава. Ядерная часть ксенолита сложена тонкозернистым агрегатом ольдгамита и ферропериклаза (Mg,Fe)O. В следующей (по направлению и контакту с базальтом зоне) в массе ольдгамита и ферропериклаза появляются зерна магнезиоферрита и ларнита. Количество двух последних минералов растет по мере приближения к базальту, к ним присоединяется меллилит.

Таким образом, нами обнаружены все фазы (кроме чистого FeO), постулированные ранее как образующие расплав по аналогии с агломератами. Отметим, что ассоциация периклаз+ларнит+магнезиоферрит является короткоживущей даже в металлургическом процессе. Она способна сохраняться лишь на контакте рудных расплавов с неусвоенными скоплениями флюса при малой длительности обжига. Возможно, объяснения требует присутствие в породах ольдгамита. Он образуется в результате реакции исходной извести CaO с продуктами термического разложения пирита, которым обогащено окаменелое дерево: $CaO + S \rightarrow CaS$.

На контакте прожилковых базальтов с ксенолитами сидеритов зональность упрощается: магнезиоферрит + ферриты Ca + периклаз; периклаз + меллилит; меллилит; базальт.

Ранее весь спектр ферритов Ca, Mg, Si и Al, известных до этого только как промежуточные продукты металлургических процессов, был диагностирован и подробно изучен Б. В. Чесноковым [6,7] в продуктах окислительного обжига карбонатов в красном горельнике. Теперь доказано их образование и на промежуточной стадии ассимиляции карбонатных ксенолитов высокожелезистыми базитовыми расплавами. В общем случае появление ферритовых фаз закономерно в офлюсованных железистом субстрате повышенной основности с пониженным содержанием SiO₂. В зависимости от химического состава системы и режима термообработки они могут выступать как промежуточные соединения и являться источником расплава при дальнейшем обжиге, либо быть итоговым продуктом минералообразования [5]. Продукты распада ферритов были обнаружены также в го-

рельниках Восточного Казахстана [1]. Однако именно техногенные горельные породы, имеющие абсолютный возраст порядка 30 лет, позволили найти эти минералы неизменными и тем самым подтвердить их непосредственное участие в процессе формирования железистых базитовых расплавов, лишней раз подчеркнув тот факт, что механизмы формирования синтетических (металлургия), техногенных (терриконы) и естественных (горельник Восточного Казахстана) низкотемпературных железо-силикатных расплавов тождественны.

Особенности химических составов минералов техногенных парабазальтов

Экзотические составы породообразующих минералов базальтоподобных паралав являются прямым следствием трех физико-химических параметров, при которых происходило их формирование: 1) необычного валового химического состава гетерогенного субстрата, подвергшегося плавлению (смесь сидеритов, карбонато-глинистых пород и аргиллитов); 2) восстановительного газового режима минералообразующей среды; 3) низкого общего давления, близкого к атмосферному.

Коренное отличие техногенных парабазальтов от магматических пород основного состава состоит в их высокой железистости, что находит свое отражение, во-первых, в необычно высоком содержании фаялитового минала в составе оливинов ($F_{a_{50-98}}$) против $F_{a_{10-25}}$ в базальтах, во-вторых, в повышении содержания клинопироксена до 50 %, в-третьих, в появлении ферромонтichelлита. Установленная опытным путем прямая пропорциональность между содержанием MgO в базальтах и габбро и количеством входящих в их состав оливина и пироксена [3] в изученных нами породах также нарушается, поскольку большинство темноцветных минералов отличается высокой железистостью.

В массивных парабазальтах оливины образуют, как минимум, две генерации кристаллов: ранние гипидиоморфные крупные индивиды с повышенным содержанием форстеритового минала ($F = 48—87\%$) и поздние ксеноморфные фаялиты ($F > 90\%$). В парабазальтовом капельнике присутствует только одна поздняя генерация, — ассоциирующая с ферромонтichelлитом, а в прожилковых парабазальтах — только ранняя (рис. 2). Гортонолиты-феррогортонолиты обладают прогрессивной зональностью, закономерно изменяя свой состав в сторону обогащения Fe_2SiO_4 . Синхронно с ростом железистости происходит



Рис. 2. Фаялит (1), ферромонтichelлит (2) и K–Al–Si фаза (3) в интерстициях между кристаллами клинопироксена (4).

Ув. 1000, полированный шлиф

накопление в кристаллах Mn и Ca. Максимальная концентрация CaO = 4 мас. % зафиксирована в оливинах из парабазальтового капельника, валовый химический состав которых отличается

наиболее высоким отношением $Ca/(Al+Na+K)$.

Пироксены являются сквозными минералами изученных ассоциаций, образуясь как ранняя кристаллическая фаза, они закономерно изменяют свой состав в ходе раскристаллизации расплавов, вследствие чего кристаллы всегда обладают прямой зональностью. Значительный разброс составов центральных частей сосуществующих индивидов (рис. 3) позволяет утверждать, что их зародышеобразование происходило многократно в течение длительного интервала времени. Наиболее поздние кристаллы пироксенов, инкрустирующие полости, являются и максимально железистыми.

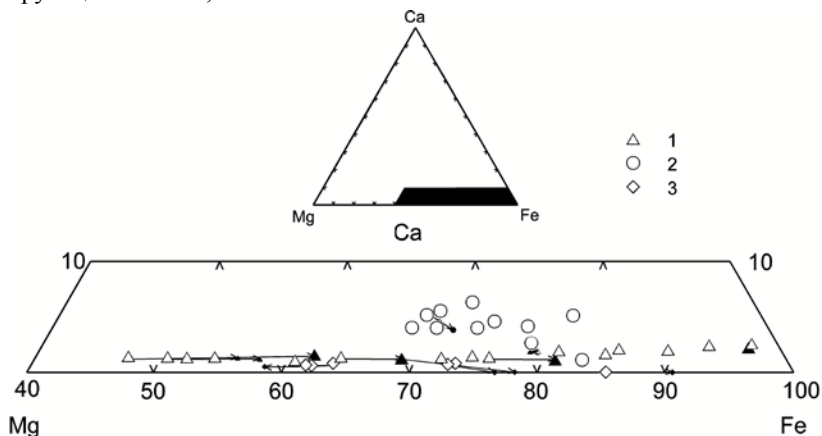


Рис. 3. Диаграмма составов оливинов из техногенных парабазальтов в координатах Fe—Mg—Ca.

1 — массивные парабазальты; 2 — парабазальтовый капельник; 3 — прожилковые парабазальты

По мере локализации значительной части Са и Mg в диопсидовом минале пироксенов, а Са и Al в плагиоклазах, в расплаве, существующем в восстановительной обстановке, все более возрастает удельная роль Fe^{2+} . Поэтому все пироксены закономерно изменяют свой состав в направлении обогащения ферросилитовым миналом. Однако низкое давление, благоприятствовавшее ранее образованию клинопироксенов, на этот раз препятствует кристаллизации ферросилита [8]. Поэтому вместо него на заключительном этапе раскристаллизации расплавов, прошедших полное фракционирование, возникает ассоциация фаялит + K-Al-Si фаза (лейцит или калишпат). В нашем случае этот тренд полностью прослежен для парабазальтов из террикона разреза «Коркинский» — массивных и капельника.

Для прожилковых парабазальтов картина несколько иная. Здесь пижонит сосуществует с авгитом и диопсидом. Размах железистости в пределах одного индивида может достигать 30 %, что весьма нетипично для природных базитовых пород. Ярко выраженная зональность пироксенов является прямым следствием резкого обеднения расплава магнием в процессе роста значительных масс этого минерала. Существенно разнятся по составу и отдельные индивиды. В числе поздних продуктов кристаллизации отсутствует фаялит, но появляется K-Al-Si стекло.

Сочетание в пределах одного шлифа оливиновых и безоливиновых ассоциаций, широкие вариации составов клинопироксенов и стекол позволяет рассматривать эти породы как яркий пример проявления мозаичных равновесий в ходе процессов пирометаморфизма. Пока это единственная группа техногенных паралав, которая сопоставима по всему спектру перечисленных параметров с природными паралавами из горельников Вайоминга [9].

Все плагиоклазы из парабазальтов являются анортитами — явление весьма редкое и само по себе достойное внимания. Объяснение ему следует искать в практически полном выгорании натрия на начальных стадиях термического преобразования терриконов. Кристаллы в основном лишены зональности, столь обычной для плагиоклазов из базальтов. Многие индивиды имеют аномальный состав и отличаются избыточными содержаниями SiO_2 и значительным дефицитом Al_2O_3 , который, вероятно всего, компенсируется вхождением Fe^{2+} и Mg^{2+} в тетраэдрические позиции структуры в ходе гетеровалентного замещения $Si^{4+} + (Fe,Mg)^{2+} \rightarrow 2Al^{3+}$.

К и Ва входят в состав плагиоклазов в весьма малых количествах ($CaO = 0.0—0.3$ мас. %; $K_2O = 0.1—0.8$ мас. %). Исключо-

чением являются только анортиты, содержащие тонкие ламели калиевого полевого шпата (K_2O до 1.8 мас. %) (рис. 4). Вследствие этого в процессе фракционной кристаллизации остаточный расплав становится обогащенным в отношении Ва и высокообогащенным в отношении К. В массивных парабазах появляются лейцит и бариевый калишпат ($K_2O = 13—15$ мас. %; $BaO = 0.6—3$ мас. %). В парабазах капельнике процесс кристаллизации завершается образованием лейцита. В прожилковых парабазах возникают К–Al–Si стекла, отличающиеся широким разбросом составов, но и здесь концентрация K_2O достигает 10 мас. %, а BaO — 3 мас. %. Для большинства проанализированных стекол характерен нормативный ортоклаз (30—86 %), целзиан (до 9 %) и анортит (до 8 %). В части из них присутствует нормативный кварц (рис. 5).

Сопоставление составов отдельных выделений в мезостазе свидетельствует, что в массивных парабазах и капельнике они обладают высокой однородностью, хотя общее их количество может значительно варьировать в разных участках образца. В прожилковых парабазах, напротив, составы остаточных

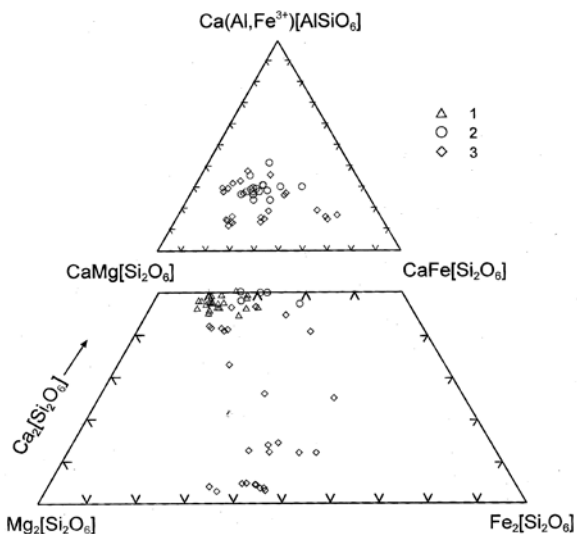


Рис. 4. Диаграмма составов пироксенов из техногенных парабазах в координатах Fe–Mg–Ca–Al.

1 — массивные парабазах; 2 — парабазах капельнике; 3 — прожилковые парабазах



Рис. 5. Интерстициальная минеральная ассоциация парабазальтового капельника:

фаялит (1), лейцит (2), титаномagnetит со структурами распада (3), самородное золото (4). Ув. 1500, полированный шлиф

расплавов существенно изменяются даже на площади одного шлифа. Наличие в этом случае калиевых стекол и отсутствие в породе калишпатов является свидетельством того, что затвердевание остаточной жидкости происходило при температуре, близкой к 1000 °С в сухих условиях [11]. Эти данные

полностью согласуются с результатами проведенного нами экспериментального плавления парабазальтов. Все три группы пород начинают плавиться в воздушной среде при $T = 1000$ °С.

Необходимо подчеркнуть, что кислые калиевые стекла зачастую тесно ассоциируют с ксеноморфными выделениями титаномagnetита. При этом остаточный расплав содержит $Fe_2O_3 < 1.5$ мас. %, $TiO_2 < 0.4$ %, $MgO < 0.2$ %. Ранние высокотемпературные ильмениты и железистые шпинелиды, столь типичные для магматических пород основного состава, в данном случае отсутствуют, их место занимает герцинит. Выделению поздних рудных фаз из остаточного железо-силикатного расплава могло способствовать как некоторое повышение fO_2 на заключительном этапе процесса раскристаллизации паралав, так и само по себе понижение температуры, вследствие которого произошло автоокисление части Fe^{2+} до Fe^{3+} . Последнее представляется бо-



Рис. 6. Интерстициальная ассоциация массивных парабазальтов:

титаномagnetит со структурами распада (1), калишпат (2), фторапатит (3) в интерстициях между кристаллами плагиоклаза (4) и клинопироксена (5). Ув. 720, полированный шлиф

лее вероятным, поскольку в большинстве случаев в породах сохраняются неизменные фаялиты, что соответствует окислительно-восстановительному потенциалу ниже линии буфера фаялит—магнетит. С мезостазисом парабазальтов помимо титаномагнетита в ряде случаев связан также и фторапатит. Таким образом фаялит (+ ферромонтichelлит), титаномагнетит, фторапатит и K-Al-Si фаза являются конечными продуктами кристаллизации парабазальтов (рис. 6, 7).

Заключение

Техногенные парабазальты радикально отличаются от природных магматических пород основного состава не только петрохимическими особенностями (обогащены Fe, Al, Ca, обеднены Na, K, Si, Mg и H₂O), но также и тем, что фракционирование компонентов расплава в данном случае имело место не между родоначальным и производным петрографическими комплексами, а непосредственно внутри одной породы. Вследствие этого в пределах любого образца оказываются совмещенными минеральные ассоциации ультрабазитов, базитов и кислых пород. В химическом плане это означает, что микрообъемы, обогащенные Ca и Mg (оливин — клинопироксеновые участки) в процессе раскристаллизации сосуществовали со смежными микрообъемами, резко обогащенными Fe (фаялиты, титаномагнетиты), а также K и Si (стекла, калишпат, лейцит).

Достаточно крупная зернистость пород, отчетливая ростовая зональность оливинов и пироксенов, наличие форм течения свидетельствуют о том, что исходные расплавы обладали низкой вязкостью. Отсутствие в паралавах каких-либо водосодержащих соединений, а также продуктов замещения первичных минералов, сохранность ольдгамита, пирротина, самородного железа, регулярное присутствие в мезостазисе фторапатита позволяют утверждать, что флюиды в данном случае не были водными, а содержали F, S, P, и некоторое количество Cl. Окислительно-восстановительный потенциал может быть оценен как не превышающий уровня фаялит—магнетитового буфера.

Минимальная температура кристаллизации расплавов, отвечающая точке твердения мезостазиса, была определена экспериментально и составляет 1000 °C.

Расплавы, возникавшие в терриконах как по способу образования, так и по особенностям химического состава, безусловно, следует считать гибридными. Доказано, что сравнительно медленное остывание такого рода магм допускает отделение оливина,

кальциевых клинопироксенов и плагиоклазов, Ti-Fe шпинелидов, после осаждения которых остаточный расплав должен приближаться по составу к фаялиту—граниту [8]. Сочетание столь разнородных ассоциаций в пределах одного образца авторы склонны объяснять влиянием скорости охлаждения. При достаточно быстром охлаждении не достигалось упорядочение дальнего порядка между несоместимыми комбинациями элементов, инкорпорированными в расплав на пике термической активности. При этом низкая вязкость жидкостей допускала упорядочение ближнего порядка между высокотемпературными (ультрабазит—базитовыми) и низкотемпературными (гранит—фаялитовыми) ассоциациями.

Зафиксированное нами явление отнюдь не уникально. Однако именно в пределах изученного объекта (с нестандартными параметрами образования) наиболее рельефно проявились закономерности, установленные ранее для природных базитовых магм: жидкости в системе $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4-CaMgSi_2O_6-CaFeSi_2O_6-KAlSi_3O_8-SiO_2$ эволюционируют от составов толеитовых и известково-щелочных базальтов в сторону существенного обогащения кремнеземом [10]. Реальным подтверждением этих тенденций на макроуровне является существование бимодальных вулканических серий [2]. Используя цитату из монографии «Магматические горные породы» [4], техногенные парабазальты можно определить как «овеществленный тренд дифференциации природных силикатных расплавов». Наблюдая на этом примере различные стадии процесса фракционной кристаллизации, реализующиеся не в условиях краткосрочных экспериментов, а в макросистеме и при длительности высокотемпературных процессов порядка 20—30 лет, можно дать объяснение отсутствию промежуточных разновидностей пород в бимодальных сериях, а также оценить долю кислого дифференциата, возникающего при нормальном протекании процессов фракционирования. В данном случае она не превышает 3—5 %.

Сохранение этой уникальной системы как единой горной породы произошло благодаря особым условиям ее кристаллизации. Отсутствие направленного давления, высокая вязкость остаточных «сухих» расплавов и ограниченное время их существования воспрепятствовали обособлению поздних кислых дифференциатов в форме самостоятельных образований. Так появились массивные парабазальты и парабазальтовый «капельник». Пройти полный путь фракционирования этим породам позволил стабильный высокотемпературный режим, существовавший в крупнейшем терриконе Челябинского угольного бассейна в процессе его горения. Более быстрое охлаждение отвала меньшего размера

(террикон ш. 42) способствовало раннему затвердеванию прожилковых парабазальтов. В этом случае расплав кристаллизовался в непосредственной близости от места своего зарождения, не образовывал сколько-нибудь значительных скоплений в крупных камерах, не претерпел полного фракционирования и был закален на стадии установления локальных равновесий в микрообъемах будущей породы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 98-05-65257).

Литература

1. *Калугин И. А., Третьяков Г. А., Бобров В. А.* Железорудные базальты в горелых породах Восточного Казахстана. Новосибирск: Наука, 1991. 80 с.
2. *Литвиновский Б. А., Занвилевич А. Н., Шадаев М. Г., Ляпунов С. М.* Условия формирования трахибазальт-трахитовой бимодальной серии: Мало-Хамардабанская вулканотектоническая структура, Забайкалье // Петрология. 1996. Т. 4. № 1. С. 26 — 45.
3. Магматизм Земли и Луны: опыт сравнительного анализа. М.: Наука, 1990. 211 с.
4. Магматические горные породы. Основные породы. М.: Наука, 1985. 487 с.
5. *Мальшева Т. Я.* Железорудное сырье: упрочение при термообработке. М.: Наука, 1988. 199 с.
6. *Чесноков Б. В.* Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна // Уральский минералогический сборник № 7. Миасс: ИМин УрО РАН. 1997. С. 5 — 32.
7. *Чесноков Б. В., Щербакова Е. П.* Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 151 с.
8. *Brown G. M., Emeleus C. H., Holland J. G., Phillips R.* Mineralogical, chemical and petrological features of Apollo 11 rocks and their relationship to igneous processes // Proceedings of the Apollo 11 lunar science conference. V. 1 (Mineralogy and petrology). Pergamon Press. New York, Oxford, Toronto, Sydney-Braunschweig. 1970. P. 195 — 219.
9. *Cosca M. A., Essene E. J., Geissman J. W., Simmons W. B., Coates D. A.* Pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal beds, Powder River Basin, Wyoming // Amer. Mineral. 1989. V. 74. P. 85—100.
10. *Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J.* Orthosilicates. In Rock-forming minerals, vol. 1A (second edition) Longman, London and NY. 1982. 919 p.
11. *Kushiro I., Nakamura Y.* Petrology of some lunar crystalline rocks // Proceedings of the Apollo 11 lunar science conference. V. 1 (Mineralogy and petrology). Pergamon Press. New York, Oxford, Toronto, Sydney-Braunschweig. 1970. P. 607 — 626.