НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2019, том 55, № 11, с. 1259–1264

УДК 552.3:66619

ПОЛУЧЕНИЕ КАМЕННОГО ЛИТЬЯ ИЗ ОЛИВИНОВОГО ДОЛЕРИТА

© 2019 г. В. А. Кренёв[1], Е. Н. Печёнкина[1], С. В. Фомичёв[1, *]

[1]Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук, Ленинский пр., 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: fomichev@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 25.02.2019 г.
После доработки 04.06.2019 г.
Принята к публикации 06.06.2019 г.

Предметом исследований являлся оливиновый долерит – полнокристаллическая разновидность основных вулканических и гипабиссальных пород подотряда нормальнощелочных, семейства базальта. На основе инновационных методов, сочетающих компьютерное физико-химическое моделирование и экспериментальное исследование, разработаны способы получения и модифицирования состава расплавов этой магматической породы для производства стеклокристаллических материалов. Эти расплавы обладают минералогической и химической однородностью, высокой жидкотекучестью и кристаллизационной способностью, удовлетворяющей требованиям камнелитного прозводства. Минеральный состав расплавов можно модифицировать путем плавления в разных атмосферах (окислительной, восстановительной и инертной).

Ключевые слова: магматические породы, плавление, петрургия

DOI: 10.1134/S0002337X19110083

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эксплуатационной стойкости и долговечности агрегатов, механизмов и их узлов, работающих в условиях химической коррозии и абразивного износа, важное значение приобретает создание материалов, превосходящих по свойствам известные аналоги, в первую очередь цветные металлы.

Среди синтетических материалов наиболее эффективным заменителем является каменное литье из магматических горных пород, характеризующееся высокой коррозионной стойкостью (позволяет противостоять воздействию практически всех щелочей и солей, в том числе и расплавов последних; в условиях воздействия 20%-ной серной кислоты при 60°С свинцовая футеровка служит 6 месяцев, а камнелитейная – 5–6 лет), высокой сопротивляемостью абразивному износу, способностью армироваться металлом. Это позволяет использовать его в химической и коксохимической промышленности (коррозионностойкие плиты и фасонное литье); для изготовления износоустойчивых изделий для облицовки каналов, желобов, течек, бункеров и др. в горнорудной и металлургической промышленности; изоляторов; щеткодержателей, штанг для масляных выключателей и др. в электротехнике; для настила полов промышленных предприятий [1, 2].

30-летний опыт Московского камнелитейного завода показал, что 1 т камня может заменить от 3 до 8 т металла [3].

Природным сырьем для получения изделий каменного литья являются основные вулканические породы семейств пикробазальтов и базальтов, а также плутонические породы семейств пироксенитов-горнблендитов и габброидов, содержащие (%): $45 \le SiO_2 \le 52$ и $0.5 \le (Na_2O + K_2O) \le 5$. Кроме этого, могут быть использованы основные и средние метаморфические породы амфиболитовой фации и рода амфиболиты [4]. Россия обладает практически неисчерпаемыми запасами габбро-базальтового сырья, пригодного для целей петрургии [5].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В работе использовался методологический подход, основанный на физико-химическом моделировании (**ФХМ**) природных и технологических процессов с последующей экспериментальной проверкой полученных результатов [6–8].

Оливиновые долериты представляют собой порфировые или афировые породы, состоящие из трех главных минералов: плагиоклазов (Pl), пироксенов (Px) и оливина (Ol). Состав Pl обычно отвечает лабрадору (Lb) с колебаниями анортитовой составляющей 10–15% (An_{60-70}). Ol имеет со-

став фаялита (Fa) Fa_{15-50} от хризолита до горнотолита, но чаще это гиалосидерит Fa_{30-50} [9].

Эта разновидность горных пород, в соответствии с граничными содержаниями породообразующих оксидов, приведенными в Петрографическом кодексе РФ [4], имеет среднее значение коэффициента кислотности 1.76, что находится в интервале значений 1.5–1.8, необходимом для каменного литья. В РФ эти породы наиболее широко развиты в пределах Сибирской и, в меньшей степени, Восточно-Европейской платформ. На Урале и Алтае они входят в состав однородных формаций натриевых базальтов [9].

Петрографические исследования играют решающую роль в выборе исходного материала, контроле на всех стадиях производственного процесса, корректировке технологии достижения оптимальных свойств изделий, разработке теоретических положений явления неравновесного минералообразования, определяющего получение силикатных материалов с заданными структурой и фазовым составом.

Выбор сырья для производства петрургических изделий определяется прежде всего их назначением. Каменное литье классифицируется по составу шихты. Основными типами литья являются: базальтовое (пироксеновое), светлокаменное (волластонит-пироксеновое), маложелезистое (жадеит-диопсидовое), фторфлогопитовое (искусственные смеси) [1].

В качестве подшихтовочного материала для улучшения литейных и кристаллизационных свойств петрургических расплавов применяют хромистый железняк, плавиковый шпат, перовскитовый концентрат, известняки, доломиты и кварцевые пески. Основное требование к сырью – экономическая и экологическая эффективность процесса. Другие требования связаны с процессами плавления шихты. Это минералогическая и химическая однородность исходных пород, жидкотекучесть и высокая кристаллизационная способность расплавов при рабочих температурах [3].

Технологический процесс изготовления камнелитых изделий состоит из подготовки сырья и приготовления шихты, получения расплава, изготовления форм и формирования отливок, их термической обработки и шлифовке готовых изделий [3].

Важным требованием к сырью является его химическая и минералогическая однородность (сырьевые материалы не должны содержать инородные примеси). Сушка сырья, как показывает практика, необходима лишь при плавлении в электропечах, однако влажность должна учитываться при составлении шихты. Гранулометрический состав сырьевых компонентов шихты чаще всего определяется типом плавильного агрегата и может составлять: для шахтно-ванной печи 80–100 мм, вагранок 40–50 мм, вращающихся плавильных печей 20–30 мм. Пылевидное сырье нежелательно, т.к. оно выносится в боров печи. Шихтовые добавки типа хромистого железняка измельчают в порошок для увеличения в расплаве количества центров кристаллизации [3].

Основная стадия процессов производства каменного литья – получение расплава с требуемыми физико-химическими и технологическими свойствами, которые определяются как химическим, так и минеральным составами сырья.

Мерой их комплексного влияния на свойства расплава является коэффициент кислотности:

$$K = (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2) : \\ : (Fe_2O_3 + FeO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O).$$

Установлено [1], что для производства камнелитных изделий необходимо сырье с коэффициентами кислотности, значения которых лежат в интервале 1.5–1.80.

Производство каменного литья из базальтов различного состава в первом приближении описывается системой альбит (Ab)–анортит (An)–диопсид (Di) (рис. 1). В этой системе Ab и An образуют твердый раствор замещения [10], а Di плавится конгруэнтно, находясь с Pl в эвтектических соотношениях. Особенность диаграммы состоит в том, что она имеет не тройную эвтектику, а непрерывный ряд бинарных эвтектик – котектическую линию, соответствующую одновременному выделению Di и Pl, состав которых непрерывно меняется вследствие взаимодействия с расплавом. В то же время, т.к. эта линия выражает эвтектические соотношения, выделение Pl и Px определяется относительным пересыщением расплава тем или иным компонентом по сравнению с эвтектическим составом, отвечающим точкам на линии Ab–An. На диаграмме этой системы фигуративные точки составов базальтов различных месторождений, пригодных для технологии каменного литья, располагаются вблизи котектической линии [1].

Что касается минерального состава, то для петрургии порода должна содержать по возможности больше Px, включающих не более 25% волластонитовой составляющей. Px придают камнелитым изделиям высокую химическую стойкость, механическую и диэлектрическую прочность. Pl уменьшают химическую стойкость, и их содержание, превышающее 50%, недопустимо для камнелитейного производства. Ol при содержании >10% снижают химическую стойкость и способствуют трещинообразованию при кристаллизации. Магнетит (Mt) при содержании более 10% также снижает химическую стойкость, механическую и диэлектрическую прочность. Содержание Pl > 50%, так же как и содержание Ol и рудных минералов (Rm) >10%, нежелательно [1, 11].

Наряду с кристаллической в петрургических изделиях присутствует стекловидная фаза. Ее количество для максимальной кислотостойкости изделий не должно превышать 15% [1]. Термостойкость возрастает, а абразивный износ изделий снижается при уменьшении содержания стекловидной фазы до 5%, и ее равномерное распределение увеличивает их прочность.

Экспериментально установлено, что фазовый состав и структура камнелитых изделий окончательно формируются при кристаллизации. Во время отжига отливок происходит лишь частичное выделение минеральных кристаллических фаз из остаточного стекла и развитие ранее выделившихся кристаллических образований.

Ряд вопросов, касающихся возможных причин химической неоднородности расплавов для каменного литья, а также возможностей "управления" минералообразованием в петрургии, рассмотрен в работах [12–18].

Шихтовые материалы резко отличаются друг от друга по температуре размягчения и плавления, гранулометрическому составу, а также по наличию в них тугоплавких составляющих. Трудность получения однородных расплавов с заданным химическим составом из смесей перечисленных материалов усугубляется их низкой теплопроводностью и высокой вязкостью первичных жидких фаз, образующихся в процессе плавления. Это в свою очередь приводит к плохому прогреву шихтовых материалов в толстом слое и медленному растворению в расплавах тугоплавких составляющих.

Кристаллизация Px начинается с магнезиального пижонита (Pg), затем выделялся авгит (Aug). Rm обычно представлены Mt, титаномагнетитом (ti-Mt) или титанитом (Tnt).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Химический состав образца оливинового долерита (мас. %): SiO_2 – 49.39, TiO_2 – 1.95, Al_2O_3 – 14.38, Fe_2O_3 – 6.20, FeO – 6.7, MgO – 8.35, CaO – 9.66, Na_2O – 2.21, K_2O – 0.96, определенный методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индукционно-связанной плазмой (ICP) на спектрометре IRIS Advantage (Thermo Jarrell Ash Corporation) в АО "Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии", показал, что полученные значения находятся в пределах содержаний породообразующих оксидов вида оливиновый долерит [9].

ФХМ было выполнено с использованием информационно-вычислительного комплекса "СЕЛЕКТОР-С" [19] (далее "Селектор") по методике, приведенной в статье [20].

Рассчитанный минеральный состав рассматриваемого образца содержал Pl, ортоклаз (Ort), Px, Ol, кварц (Q) и Tnt.

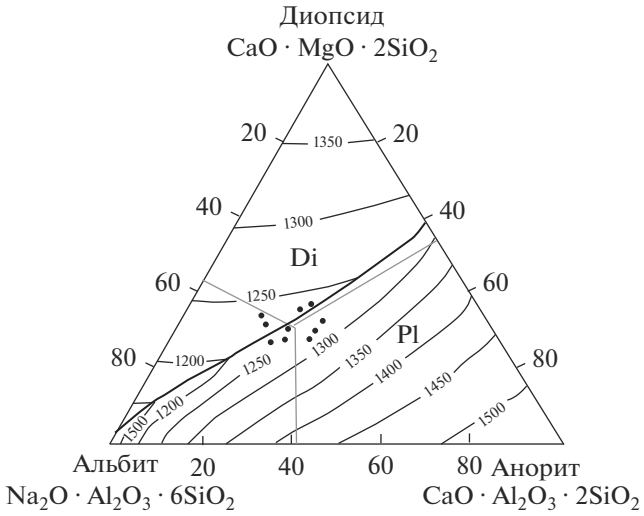

Рис. 1. Фигуративные точки составов базальтов различных месторождений, пригодных для петрургического производства.

Результаты расчетов минерального состава были подтверждены данными РФА, выполненного с помощью дифрактометра Bruker D8 Advance (θ–2θ-геометрия, CuK_α-излучение) в диапазоне углов 2θ 10°–70° с шагом 0.01° и выдержкой не менее 0.5 с на точку.

Дифрактограммы анализировали с использованием программного обеспечения Bruker Diffrac Suite EVA (база данных PDF 2 2012 г.). Следует отметить, что рентгенографическая диагностика минерального состава таких сложных природных объектов носит качественно-оценочный характер.

На основе минерального состава оливинового долерита методом ФХМ с использованием "Селектора" были рассчитаны фазовые составы расплавов, образующихся при нагревании в окислительной (на воздухе), восстановительной (H_2) и инертной (Ar) атмосферах в интервале температур 800–1400°C (табл. 1).

При нагревании на воздухе (табл. 1) содержание Pl и Ort практически не изменялось во всем интервале исследованных температур и составляло соответственно 45–46 и 3%. Содержание клинопироксенов (Cpx) в интервале температур 800–1100°C находилось в пределах от 28 до 25%, снижаясь до 22–16% при 1200–1400°C. Аналогичную тенденцию изменения содержания при повышении температуры имели и ортопироксены (Opx): 15–17% при 800–1100°C и 14–12% при 1200–1400°C. Ol появлялся при 1200°C в количестве 1%, а его содержание в расплаве возрастало с повышением температуры, достигая 18% при 1400°C. При 800°C в системе присутствовал Q в количестве 7%, который при 900°C переходил в тридимит (Trd). Содержание Tnt (3%) было постоян-

Таблица 1. Состав продуктов нагревания оливинового долерита в разных атмосферах

Минерал	Состав, %																				
	800°C			900°C			1000°C			1100°C			1200°C			1300°C			1400°C		
	O_2	H_2	A_r	O_2	H_2	Ar	O_2	H_2	Ar	O_2	H_2	Ar	O_2	H_2	Ar	O_2	H_2	Ar	O_2	H_2	Ar
Плагиоклазы, Pl	**45**	**45**	**46**	**45**	**45**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**46**	**45**	**46**	**46**	**46**
$NaAl[Si_3O_8]$,Ab	17	17	17	17	16	17	11	9	12	2	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ab-расплав	–	–	–	–	–	–	5	8	5	15	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	17
$CaAl_2[Si_3O_8]$, An	25	25	26	25	26	26	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	25	26	26	26
$KAl[Si_3O_8]$, Ort	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**
Ort-расплав	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	3	3	3	3
Клинопироксены, Cpx	**27**	**23**	**27**	**28**	**23**	**26**	**25**	**23**	**26**	**25**	**21**	**25**	**22**	**19**	**23**	**19**	**19**	**21**	**16**	**17**	**16**
$CaMg[Si_2O_6)$, Di	6	5	6	5	5	6	5	5	6	6	5	6	4	3	4	–	–	–	–	–	–
Di-расплав	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	2	1	8	9	7	16	16	15	16	17	16
$CaFeSi_2O_6$, Hed	3	5	4	5	6	5	6	6.	6	5	5	8	4	2	2	3	3	6	–	–	–
$Ca(Mg,Fe,Al)[(Si,Al)_2O_6]$, Aug	18	13	17	18	12	15	14	12	14	13	9	10	6	5	4	–	–	–	**–**	**–**	–
Ортопироксены, Opx	**15**	**19**	**14**	**17**	**21**	**15**	**17**	**20**	**17**	**14**	**19**	**15**	**14**	**17**	**13**	**13**	**17**	**12**	**12**	**12**	**12**
$Mg_2[Si_2O_6]$, En	1	3	1	**2**	3	1	2	3	2	2	5	3	3	5	2	11	7	9	10	10	10
$FeMg[Si_2O_6]$, Hyp	12	10	11	11	10	12	11	11	11	10	10	9	10	10	8	2	10	3	2	2	2
$Fe_2[Si_2O_6]$, Fs	2	8	2	4	8	2	4	6	4	3	4	3	1	2	1	–	–	–	–	–	**–**
Оливины, Ol	–	–	–	–	–	–	**1**	**1**		**4**	**6**	**4**	**11**	**11**	**11**	**15**	**15**	**15**	**18**	**17**	**18**
$Mg_2[SiO_4]$, Fo, melt	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	**–**	4	–	4	–	–	**–**	2	2	**1**	9	8	9
$Fe_2[SiO_4]$, Fa, melt	–	–	–	–	–	–	1	1	–	–	6		11.	11	11	10	11	14	9	9	9
Кварц, Q	**7**	**7**	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Тридимит, Trd	**–**	–	**7**	**4**	**5**	**7**	**5**	**4**	**5**	**5**	**2**	**4**	**4**	**4**	**4**	4	**4**	**4**	**5**	**5**	**5**
Титанит, $CaTi[SiO_4]O$, Tnt	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**

ным во всех атмосферах плавления во всем интервале температур.

Атмосфера плавления не влияла на поведение Pl, Ort, Q, Trd. При плавлении клино- и ортопироксенов, содержащих железо в разных степенях окисления, при нагревании в восстановительной атмосфере наблюдалось влияние на процесс плавления. Так, плавление Cpx в восстановительной атмосфере снижало их содержание по сравнению с окислительной и инертной атмосферами, а содержание Opx, наоборот, повышало.

Полученные результаты показали, что плавление минерального петрургического сырья в разных атмосферах позволяет изменять его состав.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Опыт петрографического изучения каменного литья показывает, что близкий к мономинеральному состав обеспечивает лучшие свойства изделий по сравнению с полиминеральным [2].

Экспериментально установлено, что фазовый состав и структура камнелитых изделий окончательно формируются при кристаллизации. Во время отжига отливок происходит лишь частичное выделение минеральных кристаллических фаз и развитие ранее выделившихся кристаллических образований.

Px – минералы, способные к широким изоморфным замещениям в своей структуре, а по физическим и химическим свойствам они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к каменному литью.

По экспериментальным данным, в состав Px в виде “молекулы” Чермака (в присутствии Na_2O) может войти до 20% Al_2O_3, около 8% Fe_2O_3 (в присутствии Al_2O_3 это количество увеличивается до 28%) и до 11% TiO_2 [1]. Неравновесные условия протекания технологических процессов способствуют вхождению Al в Px в четверную и, особенно, шестерную координации, препятствуя образованию Pl. Схематично этот процесс описывается следующими реакциями:

$$CaAl_2Si_2O_8 = CaAl_2Si_2O_6 + SiO_2,$$

$$NaAlSi_3O_8 = NaAlSi_2O_6 + SiO_2.$$

Для уменьшения содержания образующегося SiO_2 в состав расплавов вводят Ol, в результате чего также образуются Px: $SiO_2 + Mg_2SiO_4 = Mg_2Si_2O_6$ (энстатит, En); $SiO_2 + Fe_2SiO_4 = Fe_2Si_2O_6$ (ферросилит, Fs). В совокупности все эти миналы образуют Px сложного состава, обычно соответствующие авгиту (Aug) $(Na,Ca,Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Ti,Al)_2[(Si,Al)_2O_6]$. При увеличении в Px петрургического материала $CaAl_2SiO_6$ и уменьшении железистых миналов его термостойкость повышается.

В зависимости от атмосферы плавления и степени переохлаждения расплавов реализуются различные направления кристаллизации.

При плавлении оливиновых базальтов выделяют три таких направления: 1) Px–Pl для случая равновесной кристаллизации, когда весь Al идет на образование полевых шпатов; 2) практически мономинеральное пироксеновое – для неравновесных условий, Px включает железистые миналы и “молекулы” Чермака, в этих двух случаях окислительно-восстановительные условия кристаллизации не задаются, а буферируются составом шихты; 3) Mt–Px при кристаллизации с переохлаждением и в окислительной атмосфере, когда Fe связывается в Mt, а Px имеет маложелезистый состав Ca–Mg [1].

Базальтовое литье имеет следующий минеральный состав (%): моноклинный Px – до 90%, (Mt + Ol) – до 10%, хромит (Chr) – 2%, стекло – до 15%. Mt почти во всех случаях выделяется первым. Он присутствует в виде мелких кубических кристаллов или дендритных форм, образующих иногда сплошную сетку. Pl могут выделиться также при медленном охлаждении базальтового расплава в виде лабрадора (Lb) или андезина (And), кристаллических фаз из остаточного стекла в развитие ранее выделившихся кристаллических образований.

Главной минеральной фазой базальтового литья является моноклинный Px диопсид (Di) – геденбергитового (Hed) ряда. Он выделяется при медленном охлаждении расплава в интервале от 1200–1150 до 800°C (наибольшее количество – при 1150°C). Преобладающие формы выделений – сферолиты размером 60–90 мкм. В центре их располагаются буровато-красные кристаллы Chr или непрозрачные Mt. Сферолиты соединяются между собой тонкими каемками стекла, тонкозернистыми агрегатами Mt и Chr.

Структура базальтового каменного литья практически полнокристаллическая, преимущественно сферолитовая, но при определенных условиях могут образоваться дендритная, шестоватая, иногда игольчатая, а также венцово-сферолитовая и дендритно-сферолитовая структуры. Текстура чаще однородная, массивная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены сведения о возможностях применения продуктов каменного литья из магматических горных пород в качестве перспективных материалов в различных отраслях промышленности. На примере оливинового долерита методами ФХМ и экспериментального исследования определены возможности формирования производственных расплавов путем плавления сырья в различных атмосферах.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке и в соответствии с программой Президиума РАН № 37 (координатор академик РАН К.А. Солнцев).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батанова А.М., Граменицкий Е.И., Котельников А.Р., Плечев П.Ю., Щекина Т.И.* Экспериментальная и техническая петрология. М.: Научный мир, 2000. С. 41.
2. *Кренёв В.А., Бабиевская И.З., Дробот Н.Ф. и др.* Базальт – традиции и современность // Ресурсы. Технологии. Экономика. 2005. № 5. С. 15–19.
3. *Липовский И.Е., Дорофеев В.А.* Основы петрургии. М.: Металлургия, 1972. С. 320.
4. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Гл. ред. Богатиков О.А., Петров О.В., Морозов А.Ф. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. С. 200.
5. Габбро-базальтовое сырье для производства базальтового волокна. Промышленность строительных материалов. Сер. 6. Вып. 1–2 / Под ред. Раскина Э.М., Земцов А.И. М.-Пермь. 2003. С. 96.
6. *Бабиевская И.З., Дробот Н.Ф., Фомичев С.Ф. и др.* Физико-химическое моделирование процессов формирования базальтовых расплавов для петрургии // Неорган. материалы. 2008. Т. 44. № 12. С. 1476–1482.
7. *Фомичев С.В., Бабиевская И.З., Дергачева Н.П. и др* Оценка и модифицирование исходного состава габбро-базальтовых пород для получения минеральных волокон и изделий каменного литья // Неорган. материалы. 2010. Т. 46. № 10. С. 1240–1245.
8. *Кренёв В.А., Бабиевская И.З., Дергачева Н.П. и др.* Экспериментальные и расчетные методы определения минерального состава горных пород в производстве минеральных волокон и петрургии // Неорган. материалы. 2013. Т. 49. № 4. С. 424–428.
9. *Богатиков О.А.* Магматические горные породы. Т. 1. Ч. 1 и 2. М.: Наука, 1983. С. 768.
10. *Аносов В.Я., Погодин С.А.* Основные начала физико-химического анализа. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 876.
11. *Руми М.Х., Нурматов Э.П., Зуфаров М.А. и др.* Химическая стойкость материалов на основе плавленого минерального сырья Узбекистана // Стекло и керамика. 2017. № 7. С. 32–36.
12. *Хан Б.Х., Быков И.И., Кораблин В.П. и др.* Затвердевание и кристаллизация каменного литья. Киев: Наукова думка, 1969. С. 193.
13. *Рашин Г.А.* Возможности управляемого минералообразования в петрургии. Проблемы каменного литья. Вып. 2. Киев: Изд-во АН УССР, 1968. С. 12–16.
14. *Techer I., Advocat T., Lancelot J.* Dissolution Kinetics of Basaltic Glasses: Control by Solution Chemistry and Protective Effect of the Alteration Film // Chem. Geology. 2001. V. 176. № 1–4. P. 235–263.
15. *Mysen B.O.* Element Portioning between Minerals and Melt, Melt Composition and Melt Structure // Chem. Geology. 2004. V. 213. № 1–3. P. 1–16.
16. *Рашин Г.А.* К вопросу об особой роли железа при кристаллизации силикатных расплавов в неравновесных условиях // Изв. Ан СССР. Геология. 1961. № 11. С. 160–163.
17. Проблемы каменного литья (сб) / Под ред. Овчаренко Ф.Д. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. С. 227.
18. *Ходжаев Н.Т., Хакбердиев Н.М., Хамидов Р.А. и др.* Минерально-сырьевая база камнелитейного сырья Узбекистана и перспективы ее расширения // Разведка и охрана недр. 2016. № 2. С. 20–26.
19. *Чудненко К.В.* Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритм, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: ГЕО, 2010. С. 288.
20. *Бычинский В.А., Фомичев С.В., Чудненко К.В., Кренев В.А.* Физико-химическое взаимодействие в системе Si–Al–Ti–Ca–Mg–Fe–Na–K–O с учетом образования твердых растворов // Журн. неорган. химии. 2012. Т. 57. № 6. С. 925–929.