

УДК 552.3

ПРОЯВЛЕНИЯ НЕСМЕСИМОСТИ МЕЖДУ БОГАТЫМИ ЖЕЛЕЗОМ И КРЕМНИЕМ СИЛИКАТНЫМИ РАСПЛАВАМИ В МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ФЕРРОБАЗАЛЬТАХ ЛАДОЖСКОГО ГРАБЕНА, КАРЕЛИЯ, РОССИЯ

© 2022 г. А. А. Носова^{1,*}, Н. М. Лебедева¹, Л. В. Сазонова^{1,2}, А. А. Возняк¹

Представлено академиком РАН В.В. Ярмолюком 01.04.2022 г.

Поступило 01.04.2022 г.

После доработки 21.04.2022 г.

Принято к публикации 25.04.2022 г.

Впервые описаны проявления жидкостной несмесимости между высокожелезистыми и высококремнистыми силикатными расплавами в ферробазальтах Ладожского грабена (Балтийский щит), принадлежащих к мезопротерозойской анортозит-рапакивигранитной (АМСГ-типа) ассоциации. Несмесимость выражена эмульсионной вкрапленностью мелких (1–2 мкм) глобул и отдельными более крупными (10–20 мкм) глобулами тонко закристаллизованного богатого железом силикатного стекла, погруженными в интерстициальное кислое стекло. Крупные глобулы демонстрируют равновесные микроструктуры типа “ядро–оболочка” и “ядро–оболочка–корона” за счет вторичной ликвации сульфидного расплава внутри них. Глобулы содержат 31.9 ± 1.6 вес. % FeO и обеднены SiO₂, содержание которого – 39.5 ± 4.2 вес. %. Кислое стекло, в котором располагаются глобулы, имеет 61.4 ± 7.1 вес. % SiO₂ и 8.1 ± 1.5 вес. % FeO. Несмесимость могла проявиться при температурах несколько ниже 1120°C.

Ключевые слова: несмесимость, силикатные расплавы, железистые стекла, ферробазальты, анортозит-рапакивигранитная ассоциация, АМСГ, Ладожский грабен

DOI: 10.31857/S2686739722080138

ВВЕДЕНИЕ

Существование богатых железом расплавов, в виде Ti–P–Fe-силикатных, Ti–Fe-, P–Fe-, Ti–P–Fe-, Fe-оксидных и Ti–Fe-, P–Fe-карбонатных жидкостей активно обсуждается в петрологии и учении о рудных месторождениях. Допущение о том, что высокожелезистые низкокремнистые расплавы существуют, позволяет объяснить многие феномены высокожелезистых пород в эффузивном и интрузивном залегании. Например, магнетитовые лавы вулкана El Laco, ильменитовые дайки в анортозитовых комплексах и нельсонитовые дайки на месторождениях типа Кируна [1].

В ферробазальтах несмесимость силикатных, высоко-Fe и сульфидных расплавов установлена как в экспериментальных исследованиях, так и в природных объектах – ферробазальтах из круп-

ных магматических провинций (Декан, Парана и др., см. обзор в [2]). В массивах анортозит-рапакивигранитной (анортозит-мангерит-чарнокит-гранитной, АМСГ) ассоциации, с которыми связаны ферродiorиты, дайки нельсонитов и Fe–Ti–V–(P)-руды, роль несмесимости как механизма, формирующего богатые Fe расплавы, остается дискуссионной и конкурирует с представлениями о ведущей роли фракционной кристаллизации феннеровского типа (см. обзор в [3]). Возможность несмесимости для расплавов, связанных с анортозитами, показана экспериментально [1, 4], однако в природных объектах АМСГ-ассоциации ее прямые геологические, геохимические и петрографо-микроструктурные свидетельства редки [2, 5]. Основные доказательства проявления несмесимости Si- и Fe-богатых жидкостей базируются на исследованиях расплавных включений [1] и интерпретации текстурно-структурных взаимоотношений в полнокристаллических породах [6]. Это связано, в том числе с тем, что в магматических комплексах этой ассоциации, имеющих преимущественно протерозойский возраст, редко присутствуют вулканические породы (обычны только дайки), вероятно

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: nosova@igem.ru

не только из-за проблем с их сохранностью, но и в силу того, что для богатых железом высокоплотных жидкостей подъем к поверхности затруднен [7].

Ферробазальты Салми, входящие в мезопротерозойскую АМСГ-ассоциацию Ладожского грабена на севере Восточно-Европейского кратона, предоставляют редкую для древнего магматизма возможность исследовать породы, содержащие неизмененное стекло. Это обстоятельство позволило получить прямые свидетельства несмесимости Si- и Fe-богатых жидкостей в ферробазальтах из анортозит-рапакивигранитной ассоциации. В настоящем сообщении мы приводим описание проявления такой несмесимости, обнаруженное в базальтовых покровах, вскрытых одной из скважин, и на этом примере показываем особенности проявления процесса в природных условиях.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФЕРРОБАЗАЛЬТОВ

Ладожский грабен входит в Финско-Ботническо-Балтийскую рифтовую систему, развившуюся на северо-западе Восточно-Европейского кратона в области распространения мезопротерозойского магматизма АМСГ-типа. Он был заложен в начале мезопротерозоя в области сочленения архейского Карельского кратона и палеопротерозойского свекофенского орогена. Грабен выполнен 650-метровой толщиной осадков и вулканитов, в его восточном борту расположен крупный Салминский плутон гранитов рапакиви-кварцевых диоритов-анортозитов-габброноритов возрастом 1.55–1.52 млрд лет [8]. Центральная часть рифта вмещает крупный Валаамский силл феррогаббро-монцититов с возрастом 1.46 млрд лет [9], в центральной и восточной частях распространены покровы ферробазальтов и дайки ферродиоритов с возрастом 1.45 млрд лет [10].

Базальтовые потоки слагают две толщи, разделенные маломощной пачкой осадочных пород, общая мощность осадочно-вулканогенной последовательности достигает 155 м. Мощности отдельных потоков варьируют от первых м до 60 м, для кровли потоков характерны шлаки и лавобрекчии, центральные части мощных потоков имеют микродолеритовый облик. Базальты в подошве и кровле потоков миндалекаменные, в центральных частях — массивные, переходящие в долериты. Базальты имеют афировую структуру, редкие вкрапленники представлены зернами плагиоклаза. Ткань породы микродолеритовой или интерсертальной структуры сложена плагиоклазом (40–50%); клинопироксеном (10–20%), ортопироксеном (15–17%); рудными минералами — ильменитом, титаномагнетитом (10–20%); оливином (5–7%); апатитом (до 2%); иногда появляется калиевый полевой шпат (доли %); в интерсертальных разностях присутствует неизменен-

ное стекло (5–7%). Проявления несмесимости были обнаружены в виде мелких силикатных, обогащенных железом и серой глобул в стекле в оливин-ортопироксен-клинопироксеновых базальтах нижней толщи, из потоков как в ее верхней, так и в нижней части.

МЕТОДЫ

Породы изучались в прозрачно-полированных шлифах с помощью оптического микроскопа Olympus в проходящем и отраженном свете. Микроструктуры изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа в ИГЕМ РАН. Состав минералов и стекол определялся энергодисперсионным методом в ИГЕМ РАН на спектрометре X-MaxN (“Oxford Instruments”, GB) со сверхтонким окном и площадью активной зоны кристалла 50 мм², установленный на базе сканирующего электронного микроскопа JSM-6480LV (“Jeol”, Japan). Измерение состава глобул выполнялось сканированием площадей 10 мкм². Породы также изучались методом волновой дисперсии в Лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН на рентгеновском микроанализаторе JXA-8200 (“Jeol”). Состав пород определен рентгенофлуоресцентным методом в ИГЕМ РАН на спектрометре PW-2400 производства компании “Philips Analytical B.V.”.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроструктурные особенности. В выполненных неизмененным стеклом интерстициях, преимущественно между кристаллами плагиоклаза, мы наблюдали следующие прямые микроструктурные свидетельства сосуществования двух жидкостей: (1) многочисленные относительно равномерно распределенные мелкие силикатные глобулы богатого Fe состава в кислом стекле (рис. 1а, б); (2) одиночные относительно крупные силикатные глобулы, обогащенные Fe и S, погруженные в кислое стекло, обычно с мелкими обильными кристаллитами Fe-оксидов, часто выстроенными в цепочки, и очень мелкими (1–2 мкм) фуляровидными кристаллами апатита (рис. 1в, г); (3) мелкие (<1 мкм) капли (полусферы) богатого Fe состава, инкрустирующие грани кристаллов плагиоклазов, замыкающих интерстиции с кислым стеклом (рис. 1а, б); (4) эпитаксиальные образования магнетитом и пироксеном кристаллов ильменита, имеющие фестончатые края (рис. 1д, е).

Мелкие глобулы эмульсионного типа (1) имеют в основном размеры 1 мкм и менее, редко достигая 2–3 мкм и в единичных случаях — 5 мкм. На площади 10 × 10 мкм располагается от 10 до 20 мелких глобул. Вблизи поверхности кристаллов уменьшения количества глобул не фиксируется. Осевшие на грани кристаллов капли имеют близ-

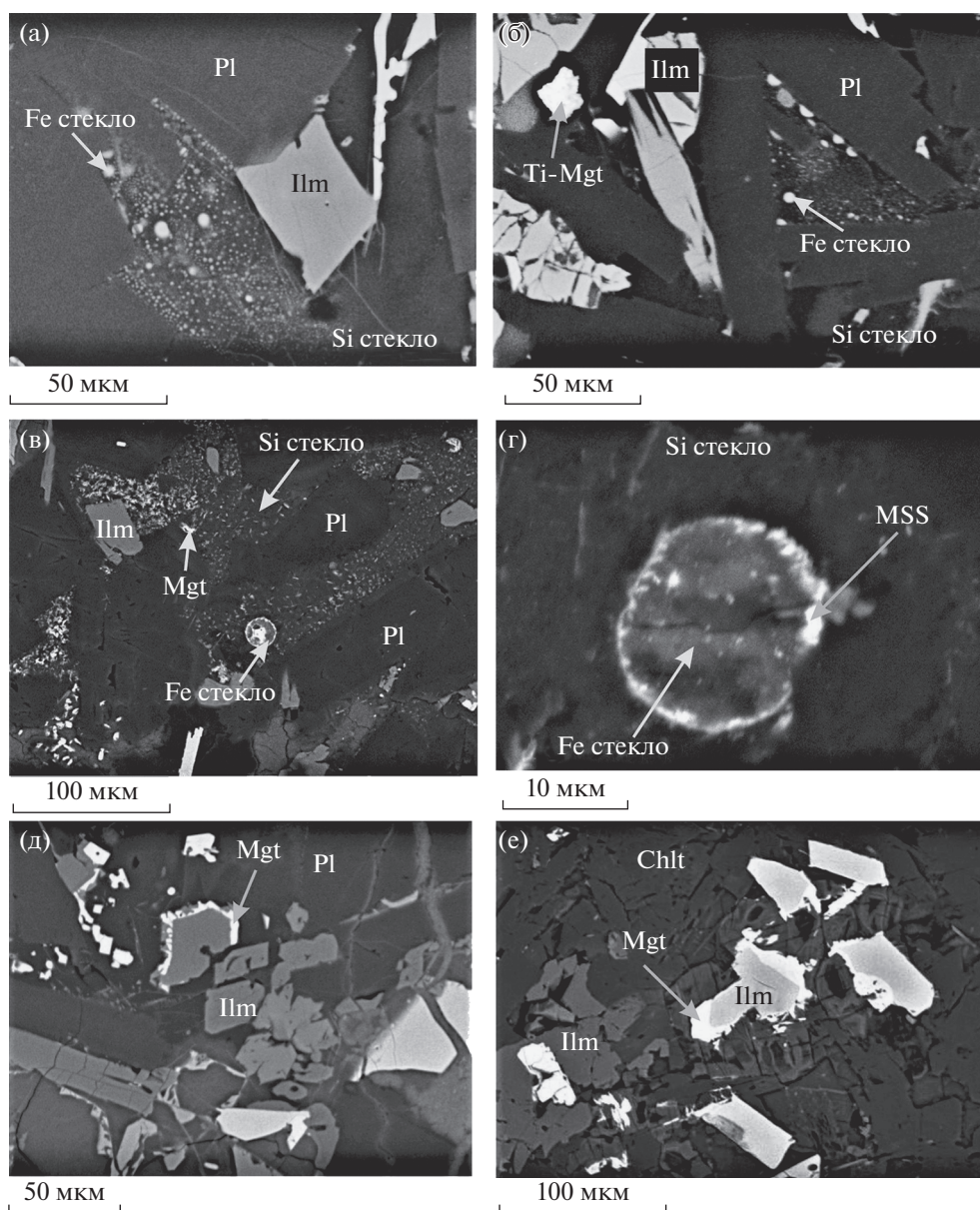


Рис. 1. BSE-изображения микроструктур жидкостной несмеси между высокожелезистыми и высококремнистыми расплавами в ферробазальтах Салми: а – эмульсионная вкрапленность мелких капель высоко-Fe силикатного состава в кислом стекле в интерстиции между кристаллами плагиоклаза и ильменита; б – то же, поверхность кристалла плагиоклаза инкрустирована мелкими каплями высоко-Fe силикатного расплава, в виде полусфер; в – глобула зонального строения, состоящая из раскристаллизованного высоко-Fe силикатного стекла с сульфидным центром и сульфидной внешней оболочкой (в центре кадра), погруженная в кислое стекло с многочисленными кристаллитами магнетита в интерстиции; г – глобула, сложенная высоко-Fe силикатным стеклом и сульфидной внешней оболочкой; д, е – кристаллы ильменита с эпитаксиальным обрастанием магнетитом с фестончатыми краями. Фото а, б, д, е – образец 1003-226; в, г – образец 871-271.

кие размеры, но различную кривизну поверхности, что отражает вариации величины угла смачивания. Наблюдаются интерстиции, где количество прикрепленных глобул выше, чем свободно расположенных в них. Иногда можно заметить мелкие столбики плагиоклаза, растущие внутрь капель, что отражает более высокие скорости диффузии компонентов плагиоклаза в менее вязком Fe-богатом расплаве [11].

Крупные глобулы типа (2) имеют размеры 15–20 мкм, обычно они присутствуют в объеме отдельных интерстиций в единичном количестве. Как правило, они частично закристаллизованы, прежде всего, по внешней контуре, а выполняющий внутреннюю часть глобулы крипнокристаллический агрегат представляет собой, вероятно, частично закристаллизованное стекло. Внешняя оболочка глобул может быть выполнена пирротитом.

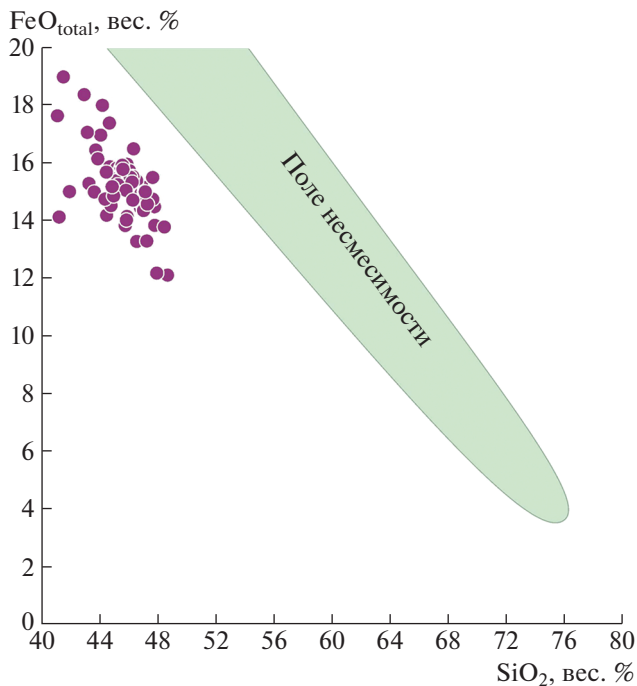


Рис. 2. Составы ферробазальтов Салми на диаграмме SiO_2 – $\text{FeO}_{\text{total}}$. Показаны поле несмесимости богатых Fe и Si силикатных расплавов по [16].

ном (моносльфидным твердым раствором, mss) или агрегатом мелких кристаллов (1–2 мкм) магнетита и ортопироксена либо магнетита и пирротина. В центре таких глобул часто располагаются сульфидные обособления близкого к халькопиритовому составу (Ni–Cu–Fe твердый раствор, iss), их размер может быть до 3×3 мкм, они обычно изометричны с неправильными контурами. Иногда в Fe-оксидных каплях отмечаются кристаллы щелочных полевых шпатов, растущие снаружи внутрь глобулы, пересекая ее границы; также мы наблюдали проявления коалесценции – слипшиеся глобулы.

Фестончатые и бахромчатые оторочки присутствуют в виде эпитаксиальных обрастаний магнетита и пироксена на кристаллах ильменита, они являются характерной микроструктурой, возникающей при быстрой кристаллизации фаз в граничном слое кристалла, обогащенном элементами, не входящими в этот кристалл [11].

Валовые составы пород, в которых наблюдалась несмесимость. Составы таких пород соответствуют ферробазальтовым – в них содержания FeO достигают 17.1 вес. % при низких концентрациях SiO_2 (до 46.1 вес. %) (рис. 2, табл. 1). Они содержат до 4.3 вес. % MgO и их магнезиальность ($\text{Mg}\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$, моль) составляет 0.32–0.35. В той же толще покровов присутствуют более магнезиальные породы, характеризующиеся $\text{Mg}\# = 0.47$ –0.48, т.е. имеющие относительно прими-

тивные составы. По сравнению с такими примитивными составами, породы с признаками несмесимости имеют более низкие концентрации TiO_2 (5.0–5.1 и 4.0–4.1 вес. % соответственно), фосфора (1.5–1.6 и 1.2 вес. % P_2O_5) и натрия (3.8–5.1 и 2.8 вес. % Na_2O) и более высокие концентрации CaO (2.7–6.3 и 8.0–8.4 вес. % соответственно).

Составы глобул и стекол. Как мелкие глобулы типа (1), так и крупные глобулы типа (2) имеют близкие составы, они обогащены железом и содержат 31–34 вес. % FeO и обеднены SiO_2 , содержание которого составляет 32–44 вес. %. Кислое стекло, в котором располагаются глобулы, имеет 60–69 вес. % SiO_2 и 5–10 вес. % FeO. Средние составы высокожелезистых глобул типа (2) и вмещающих их высококремнистых стекол приведены в табл. 1. Дефицит суммы в высоко-Fe глобулах составляет от 9 до 2 вес. %, в высоко-Si стеклах – не более 2 вес. %. Во всех случаях в железистом агрегате в глобулах по сравнению с кислыми стеклами и валовым составом породы концентрируются Mg, S, Co, Ni, Cu, Zn; в кислых стеклах – Al, Na, K. Поведение Ti и P не столь отчетливо, но в целом титан обогащает железистые составы, тогда как фосфор – кислые стекла. Кальций демонстрирует тренд в обогащении кислого стекла относительно железистого агрегата глобул.

Условия кристаллизации расплавов – $T, f\text{O}_2$. Параметры кристаллизации ферробазальтов Салми, полученные с помощью моделирования в программе COMAGMAT [12], отвечают высоким температурам (1070–1150°C) и низкой фугитивности кислорода – ниже уровня буфера кварц-фаялит-магнетит на полпорядка. Эти оценки хорошо сходятся с определением T - $f\text{O}_2$ параметров ($T = 1080$ –1180°C, $\lg f\text{O}_2 = -10.4$ – $+9.3$ или 0.7–0.8 лог. единиц ниже QFM-буфера) с помощью ильменит-магнетитового термооксибарометра [13] для тех же пород. Для валовых составов пород, в которых обнаружены железистые глобулы, мы рассчитали температуры ликвидуса, используя программу COMAGMAT, предназначенную для расчета толеитовых составов [12]. Полученные температуры составили 1102–1122°C.

ОБСУЖДЕНИЕ

Несмесимость появляется в толеитовых магмах, фракционирующих по феннеровскому тренду, с обогащением Fe относительно щелочей вследствие восстановительных условий, препятствующих ранней кристаллизации магнетита. В природных ферробазальтах составы несмешиваемых Fe- и Si-расплавов широко варьируют и обозначают более широкое поле несмесимости, чем установленное в экспериментах (например, [15]).

Таблица 1. Валовые составы ферробазальтов Ладожского грабена с проявлениями несмесимости и средние составы обнаруженных в них сосуществующих пар высоко-Fe глобул и вмещающего их высоко-Si стекла, вес. %

Образец	Ферробазальт		Высоко-Fe глобула		Высоко-Si стекло	
	1003–226	871–271	среднее	станд. откл.	среднее	станд. откл.
SiO ₂	46.09	45.51	39.50	4.15	61.39	7.65
TiO ₂	3.91	4.00	0.40	0.28	0.71	0.28
Al ₂ O ₃	13.12	12.79	4.42	0.90	11.60	2.18
FeO	–	–	31.93	1.62	8.07	1.53
Fe ₂ O ₃	16.67	17.13	–	–	–	–
MnO	0.21	0.22	0.29	0.10	0.10	0.02
MgO	4.06	4.29	7.61	2.25	2.08	0.57
CaO	8.40	7.96	0.91	0.37	2.59	3.84
Na ₂ O	2.76	2.81	0.94	0.36	2.46	0.83
K ₂ O	0.72	1.59	0.40	0.28	5.96	1.50
P ₂ O ₅	1.23	1.21	0.02	0.01	0.62	0.76
SO ₃	–	–	2.95	2.73	0.03	0.02
S	0.03	0.02	–	–	–	–
ппп	2.45	2.10	–	–	–	–
Сумма	99.62	99.61	–	–	–	–

Примечание: $N = 13$ число проанализированных сосуществующих пар высоко-Fe глобула – вмещающее высоко-Si стекло, “прочерк” – не определялось/не рассчитывалось.

Это может быть связано с влиянием кинетических эффектов [16], кристаллизацией не содержащих Fe фаз, обогащающей им прилегающий слой расплава [11], и проявлением несмесимости в области более высоких температур, чем было установлено в экспериментах.

Микроструктуры несмесимости: свидетельства равновесной ликвации. Глобулы высокожелезистого состава типа (2), представленные в образце 871–271 (рис. 1 в, г), демонстрируют микроструктуры, типичные для проявлений несмесимости при относительно длительно протекающем процессе охлаждения, что позволяет системе приблизиться к равновесию. Эти микроструктуры хорошо изучены для сплавов (например, [17]). Такие микроструктурные признаки, как довольно крупные размеры глобул типа (2), появление внутри этих глобул выделений сульфидов, агрегация сульфидного вещества iss-типа в центре глобулы и появление внешних оторочек mss у глобул, коалесценция глобул – указывают, что в системе протекали процессы диффузионного роста, слияния капель и их остывальдова созревания, что приводило к укрупнению капель высокожелезистой жидкости, а внутри глобул – вторичной жидкостной несмесимости с выделением сульфидного расплава и миграция вещества за счет эффектов Марангони и Стокса, что формировало структуры “ядро–оболочка” и “ядро–оболочка–корона”.

Составы ферробазальтов Салми и область несмесимости. Составы ферробазальтов Салми на диаграмме SiO₂–FeO (рис. 2) лежат левее поля несмесимости, определенного в экспериментах [16]. Такую же позицию занимают практически все ферробазальты, в которых установлены проявления несмесимости, что указывает на специфические условия, в которых может проявиться несмесимость [3]. В ферробазальтах область несмесимости разделяет высоко-Fe- и высоко-Si жидкости: первые обычно содержат от 25 до 40 вес. % FeO и не более 45 вес. % SiO₂, вторые – более 55 вес. % SiO₂ и не более 5–10 вес. % FeO [3, 5]. Железисто-силикатное вещество, заполняющее изученные нами Fe-глобулы, содержит сопоставимое количество FeO и SiO₂: отношение FeO/SiO₂ варьирует от 0.7 до 1.1, что в целом перекрывается как с природными обогащенными Fe стеклами, образованными за счет несмесимости в ферробазальтах, так и с величинами FeO/SiO₂ в экспериментальных железистых стеклах (0.5–0.9, [16]). На диаграмме (рис. 3) видно, что в системе лейцит–фаялит–SiO₂ составы высоко-Fe глобул и вмещающих их кислых стекол расположены в области полей несмесимости в этой системе [14].

Несмесимость в высоко-Mg расплавах. Природные железистые стекла во многих случаях характеризуются низкими концентрациями MgO (1.0–1.5 вес. %) и величинами Mg# в пределах

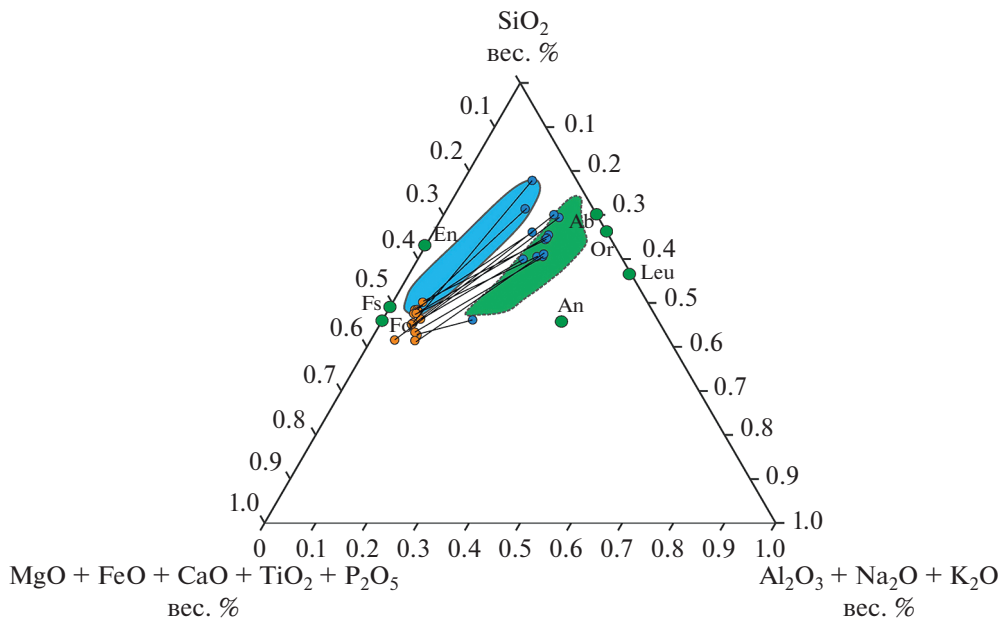


Рис. 3. Составы богатых железом силикатных глобул (коричневые кружки) и вмещающих их богатых кремнеземом стекол (голубые кружки) на псевдотройной диаграмме системы фаялит–лейцит– SiO_2 , с полями несовместимости для вулканитов (зеленое) и лунных базальтов (голубое), показано по [14].

0.05–0.07 [3, 5]. Эксперименты показывают, что несовместимость в низко-Mg расплавах фиксируется при относительно низких температурах, около 1020°C [16]. Если же несовместимость наступает при высоких температурах, то ее признаками служат высокие содержания MgO и не столь значительные различия в содержаниях FeO и SiO_2 между сосуществующими жидкостями, указывающие на позицию вблизи купола бинадвали [18]. Железистые глобулы в ферробазальтах Салми относительно обогащены магнием, они содержат 4.7–8.7 вес. % MgO и имеют $\text{Mg}\#$ 0.18–0.32. Различия между средними содержаниями FeO и SiO_2 в глобулах и вмещающем их стекле составляют 24 и 25 вес. % соответственно, тогда как в природных стеклах могут достигать 28 и 32 вес. % соответственно [3]. Подобные высокие содержания MgO и сопоставимые различия в составах установлены в расплавных включениях в плагиоклазах из ферробазальтов (например, [18, 19]). Определение температур гомогенизации включений в плагиоклазе из богатых Mg ферробазальтовых расплавов и эксперименты с такими расплавами показали, что несовместимость здесь проявляется при более высоких температурах, чем в экспериментах [16], около 1100°C [18] или даже выше [11, 19]. Полученную нами оценку ликвидусной температуры около 1100°C мы использовали как максимально возможную, чтобы показать позицию несмешивающихся жидкостей из наших ферробазальтов на бинадвали (рис. 4). Однако несовместимость, скорее всего, имела место после кристаллизации ча-

сти расплава, т.е. при температуре ниже ликвидусной, и точки составов могут отвечать более низким температурам. Поэтому мы показали на диаграмме рис. 4 области, в которых расположены наши составы, и участки бинадвали, установленной для природных объектов [11] и в экспериментах [16], на которые они могут проецироваться. Как видно, наши данные хорошо согласуются с областью расслоения в ферробазальтовых расплавах, предложенной в [11, 16].

Наши данные, учитывая высоко-Mg состав железистых глобул, также подтверждают, что процесс расслоения в природных ферробазальтовых системах может происходить в области относительно высоких температур, сопоставимых с температурами, которые определяются при изучении расплавных включений с признаками силикатно-железистой несовместимости [18, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования носят предварительный характер, тем не менее они убедительно показали природный пример проявления несовместимости между двумя силикатными расплавами: высокожелезистым и высококремнистым, в вулканиках, принадлежащих к АМСГ-ассоциации. Как известно, фракционирование по фернеровскому тренду с накоплением железа типично для пород толеитовой серии. Породы этой серии наиболее распространены в областях внутримитного магматизма и на континентах связаны с фор-

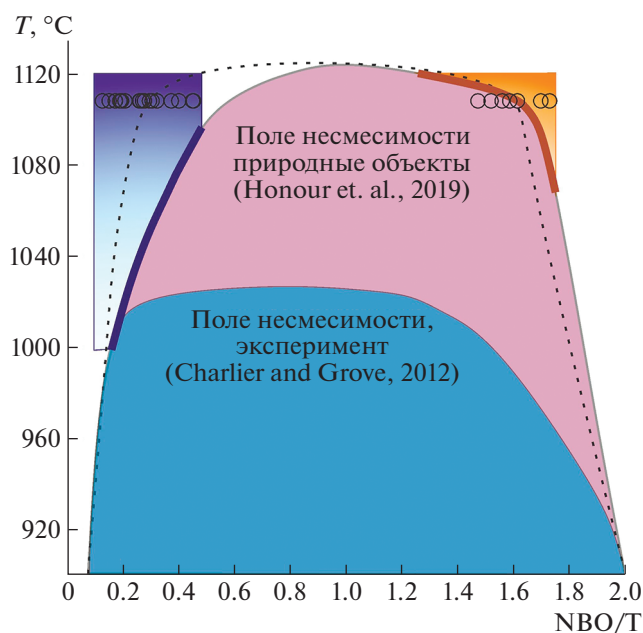


Рис. 4. Составы богатых железом силикатных глобул (кружки в коричневой области) и вмещающих их богатых кремнеземом стекол (кружки в голубой области) на бинарной диаграмме $T, ^\circ\text{C}$ – NBO/T с полями несмеси в силикатных расплавах, обогащенных железом, по экспериментальным данным [16] и в природных объектах по [11]. Коричневая и голубая области соответствуют возможному положению в пространстве диаграммы составов богатых железом глобул и вмещающих их кислых стекол соответственно. Кружки показаны для максимальной температуры, рассчитанной как ликвидусная для пород, в которых была зафиксирована несмесь (см. текст). Жирными линиями показаны участки бинодали, на которые могут быть проецированы точки несмеси составов. Показатель NBO/T (отношение нестиковых кислорода (NBO) к мостиковым (T)) был рассчитан по $[\text{20}], T = \text{Si} + \text{Al} + \text{P} + \text{Ti}$.

мированием крупных магматических провинций, в составе которых присутствуют расслоенные интрузивы и базальтовые потоки со свидетельствами разделения высоко-Fe и высоко-Si жидкостей [3]. Для расплавов анортозит-рапакивигранитной ассоциации, формирующейся на посторогенном этапе развития кратонов, предполагается, что появление составов, обогащенных Fe и другими компонентами, такими как Ti, P (йотунитовых), происходит за счет ранней кристаллизации и ухода в кумулус плагиоклазов. Планируемое дальнейшее исследование ферробазальтов Салми и комагматичного им Валаамского силла позволит рассмотреть механизмы обогащения расплавов Fe вплоть до появления несмеси, что может пролить свет на природу завершающих проявлений магматизма Ладожского грабена.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 27-22-318.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang M., Veksler I., Zhang Z., et al. The Origin of Nelsontite Constrained by Melting Experiment and Melt Inclusions in Apatite: The Damiao Anorthosite Complex, North China Craton // *Gondwana Research*. 2017. V. 42. P. 163–176. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.015>
2. Charlier B., Namur O., Grove T.L. Compositional and Kinetic Controls on Liquid Immiscibility in Ferrobasalt–rhyolite Volcanic and Plutonic Series // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. V. 113. P. 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.03.017>
3. Veksler I.V., Charlier B. Stable and Metastable Silicate Liquid Immiscibility in Ferrobasalts Layered Intrusions. 2015. Springer Editors: Charlier B., Namur O., Latypov R., Tegner C. P. 229–258.
4. Philpotts A.R. Composition of Immiscible Liquids in Volcanic Rocks // *Contrib Mineral Petrol*. 1982. V. 80. P. 201–218. <https://doi.org/10.1007/BF00371350>
5. Snyder G.A., Mitchell J., Taylor L.A., et al. Silicate Liquid Immiscibility in Anorthosite Suites: Viewing the Moon from Wyoming and Labrador. Abstr. of the 25th Lunar and Planetary Science Conference (Houston). 1994. P. 1303.
6. Coit N., Keiding J.K., Ihlen P.M. Evidence for Silicate–Liquid Immiscibility in Monzonites and Petrogenesis of Associated Fe–Ti–P-rich rocks: Example from the Raftsund Intrusion, Lofoten, Northern Norway // *Journal of Petrology*. 2020. V. 61. № 4. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa045>
7. Namur O., Charlier B., Holness M.B. Dual Origin of Fe–Ti–P Gabbros by Immiscibility and Fractional Crystallization of Evolved Tholeiitic Basalts in the Sept Iles Layered Intrusion // *Lithos*. 2012. V. 154. P. 100–114.
8. Amelin Y., Larin A., Tucker R. Chronology of Multi-phase Emplacement of the Salmi Rapakivi Granite-anorthosite Complex, Baltic Shield: Implications for Magmatic Evolution // *Contrib Mineral Petrol*. 1997. V. 127. P. 353–368. <https://doi.org/10.1007/s004100050285>
9. Salminen J., Pesonen L. Paleomagnetic and Rock Magnetic Study of the Mesoproterozoic Sill, Valaam Island, Russian Karelia // *Precambrian Research*. 2007. V. 159. P. 212–230. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.06.009>
10. Lubnina N.V., Mertanen S., Söderlund U., et al. A New Key Pole for the East European Craton at 1452Ma: Palaeomagnetic and geochronological Constraints from Mafic Rocks in the Lake Ladoga Region (Russian Karelia) // *Precambrian Research*. 2010. V. 183. № 3. P. 442–462. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.014>
11. Honour V.C., Holness M.B., Partridge J.L., et al. Microstructural Evolution of Silicate Immiscible Liquids in Ferrobasalts // *Contrib Mineral Petrol*. 2019. V. 174. № 77. <https://doi.org/10.1007/s00410-019-1610-6>
12. Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. Москва: Наука, МАИК “Наука/Интерперидика”, 2000. 363 с.

13. *Andersen D.J., Lindsley D.H.* New (and Final!) Models for the Ti-magnetite/ilmenite Geothermometer and Oxygen Barometer. Abstract AGU 1985 Spring Meeting Eos Transactions. American Geophysical Union. 1985. V. 66. № 18. P. 416.
14. *Thompson A.B., Aerts M., Hack A.C.* Liquid Immiscibility in Silicate Melts and Related Systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 2007. V. 65. № 1. P. 99–127.
<https://doi.org/10.2138/rmg.2007.65.4>
15. *Borisov A., Veksler I.V.* Immiscible Silicate Liquids: K and Fe Distribution as a Test for Chemical Equilibrium and Insight into the Kinetics of Magma Unmixing // *Contrib Mineral Petrol.* 2021. V. 176. № 47.
<https://doi.org/10.1007/s00410-021-01798-1>
16. *Charlier B., Grove T.L.* Experiments on Liquid Immiscibility along Tholeiitic Liquid Lines of Descent // *Contrib Mineral Petrol.* 2012. V. 164. P. 27–44.
<https://doi.org/10.1007/s00410-012-0723-y>
17. *Wei C., Wang J., He Y., Li J., Beaunon E.* Solidification of Immiscible Alloys under High Magnetic Field: A Review // *Metals.* 2021. V. 11. P. 525.
<https://doi.org/10.3390/met11030525>
18. *Veksler I.V., Dorfman A.M., Borisov A.A., et al.* Liquid Immiscibility and the Evolution of Basaltic Magma // *Journal of Petrology.* 2007. V. 48. № 11. P. 2187–2210.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egm056>
19. *Андреева О.А., Андреева И.А., Ярмолюк В.В. и др.* Силикатная жидкостная несмесимость как результат феннеровского типа дифференциации толеитовых магм вулкана Ван-Тянь (Северо-Восточный Китай) // *Петрология.* 2020. Т. 28. № 4. С. 393–412.
<https://doi.org/10.31857/S0869590320040020>
20. *Mysen B.O., Virgo D., Seifert F.A.* The Structure of Silicate Melts: Implications for Chemical and Physical Properties of Natural Magma // *Rev. Geophys.* 1982. V. 20. № 3. P. 353–383.
<https://doi.org/10.1029/RG020i003p00353>

THE Fe-RICH AND Si-RICH SILICATE MELTS IMMISCIBILITY: INSIGHTS FROM MICROSTRUCTURES AND GLASS COMPOSITIONS IN THE MESOPROTEROZOIC SALMI FERROBASALTS, KARELIA, RUSSIA

A. A. Nosova^{a,#}, N. M. Lebedeva^a, L. V. Sazonova^{a,b}, and A. A. Voznyak^a

^a *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russian Federation*

^b *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: nosova@igem.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Yarmolyuk April 1, 2022

Evidences for liquid immiscibility between Fe-rich and Si-rich silicate melts in ferrobasalts of the Ladoga graben in the Baltic shield are reported. The ferrobasalts are spatially and temporally associated with 1.54–1.45 Ga Mesoproterozoic anorthosite-rapakivi granite (AMCG) complex. The liquid immiscibility microstructures are represented by emulsion of tiny globules (1–2 μm) or individual larger globules (10–20 μm) of finely crystallized iron-rich hydrated silicate glass embedded in Si-rich glass. Large globules show core-shell and core-shell-corona types segregation microstructures, indicating equilibrium immiscibility. The globules have high FeO content (31.9 ± 1.6 wt %) and low SiO₂ content (39.5 ± 4.2 wt %). The Si-rich glass matrix contains 61.4 ± 7.1 wt % SiO₂ and 8.1 ± 1.5 wt % FeO. Obtained data indicate that the immiscibility has occurred under the temperature lower than 1120°C.

Keywords: immiscibility, silicate melts, Fe-rich glass, ferrobasalts, anorthosite-rapakivi granite (AMCG), Ladoga graben