

УДК 552.323.4

О ВОЗМОЖНОСТИ СМЕШЕНИЯ СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВОВ

Р.Н. Соболев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 15.09.17

Силикатные расплавы обладают высокой вязкостью, их движение имеет ламинарный характер. Механическое перемешивание таких расплавов в принципе возможно, однако требует очень больших энергетических затрат. Образование гомогенных расплавов происходит диффузионным способом. Масштабы такого смешения чрезвычайно малы и не имеют геологического значения.

Ключевые слова: вязкость, расплавы, диффузия, смешение, перемешивание.

Sobolev R.N. A possibility silicate melts mixing. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2017. Volume 92, part 6. P. 43–48.

Silicate melts are high-viscosity liquids. Their moving has mostly laminar nature. Mixing of such melts is possible, but demands large expenditure of energy. The result of mixing processes form heterogeneous melts. As concern of homogeneous melts they form as a result of diffusion. Volume of such mixing are extremely small and have no geological significance.

Key words: melts, viscosity, diffusion, mixing, intermixing.

Постановка вопроса

Вопрос об образовании расплавов промежуточного состава в результате смешения расплавов контрастных химических составов дискутируется со второй половины XIX в. (Розенбуш, 1934). Обзор современных представлений о смешении вязких расплавов применительно к генезису андезитов рассмотрен в публикациях (Анфилогов, 2010; Fomin, Plechov, 2012). В работе (Заварицкий, 1937) представления о смешении силикатных расплавов применены к генезису пород гибридного происхождения (гранодиориты, кварцевые диориты и др.). Авторы этих публикаций подходили к образованию таких пород, используя геологические наблюдения, данные о химизме пород и др. При этом, однако, не учитывались физические свойства расплавов и энергетические аспекты процесса их взаимодействия. Принципиально важен и тот факт, что объемы андезитов и гранодиоритов составляют сотни и тысячи кубических километров.

Кроме явных ксенолитов в магматических горных породах находятся включения (обычно основного состава) овальной формы размером в несколько сантиметров и больше. Нередки также меланократовые линзы длиной несколько десятков сантиметров. Они описаны в диоритах и гранодиоритах и, как правило, приурочены к породам эндоконтактной фации. Включения встречаются и в вулканических породах (Соболев и др., 2001). Включения, как правило, имеют зональное строение: центральная среднезернистая часть окружена мелкозернистой каемкой. Контакт между центральной частью включения и каемкой четкий, но не резкий. Ширина каемки обычно не превышает 1 см, и она имеет резкую

границу с вмещающей магматической породой (рис. 1). В ряде случаев около включения вмещающая порода имеет более лейкократовый состав.

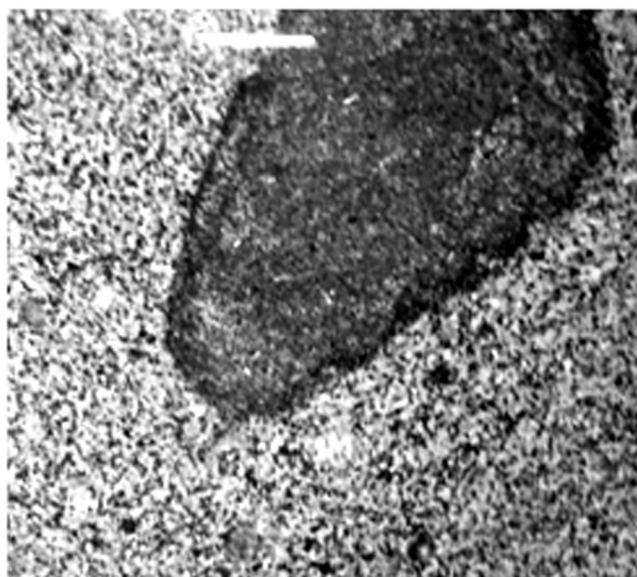


Рис. 1. Меланократовое включение. Длина белой полосы 1,5 см

Нахождение в магматических породах обломков (ксенолиты) других горных пород (магматических, метаморфических, осадочных) — обычное явление. Однако это захват обломка, но не перемешивание и тем более не смешение. При анализе проблемы смешения расплавов необходимо учитывать, что обмен веществом происходит через поверхность контактирующих сред. Чем больше поверхность, тем значимее результаты взаимодействия.

В геологической литературе, как правило, не различают понятия «перемешивание» и «смешение». Уточним, что перемешивание — это механический процесс, требующий больших энергетических затрат. Выделяют: перемешивание кристаллических веществ, перемешивание жидкости с кристаллическим веществом и перемешивание жидкости с жидкостью. Образующаяся в результате перемешивания система всегда гетерогенна (Брагинский и др., 1984). Принципиально важно, что перемешивание жидкостей происходит только при возникновении турбулентности на их контакте (Ландау, Лившиц, 1986). Смешение — это диффузионный процесс, при котором образуется гомогенная система (Flinders, 1996). Оба процесса требуют затраты энергии для их реализации.

Процесс механического перемешивания вязких сред

При таком перемешивании исходные среды, образующие систему (жидкости, расплавы), имеют четкую границу, различимую визуально. Если среды неподвижны, то отсутствие взаимодействия между ними может длиться бесконечно долго. При механическом перемешивании вязких сред они растягиваются и изгибаются. Это приводит к значительному увеличению площади контакта между средами как в результате растяжения и деформирования, так и при последующем перемещении поверхности при ее изгибе во всем объеме. Чем тщательнее перемешивание, тем больше количество нитей, они становятся тоньше, но границы между ними всегда резкие и система остается гетерогенной. При механическом перемешивании в системе всегда остаются зоны, которые не участвуют в перемешивании (рис. 2). Процесс механического перемешивания обычно моделируют на примере одной частицы. При этом принимается, что движение точки в жидкости хаотично, вследствие чего процесс перемешивания непредсказуем (Мелешко, Краснопольская, 2005; Пуанкаре, 1972). Примером динамической системы, имеющей бесконечное число периоди-

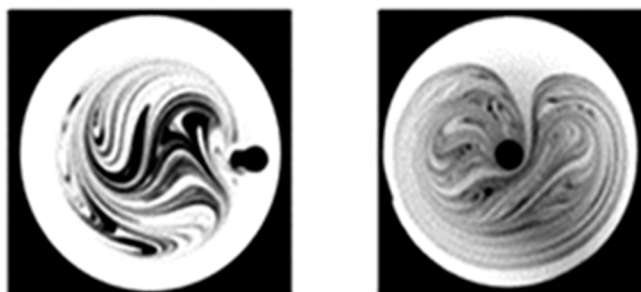


Рис. 2. Стадии перемешивания. Растяжение, утонение и деформация слоев при перемешивании жидкостей. Хаотическое движение точек. Два типа перемешивания: большая площадь хаоса и не перемешанные небольшие правильные острова, по (Мелешко, Краснопольская, 2005; Gouillart et al., 2009)

ческих точек, хаотическую динамику и не разрушающейся при малых возмущениях системы, являются подковы Смейла. Представления об однородности—неоднородности горных пород базируются на визуальном восприятии. Система визуально кажется однородной, если толщина нитей меньше 0,025 мм.

Механическое и диффузионное взаимодействие детально изучено на примере океанических течений. Установлено, что вода этих течений гетерогенна: разность температур в ней может достигать 10°C на расстоянии 50–60 м. Значения скоростей движения отдельных потоков в пределах течения изменяются от 10 до 20 см/сек. Значительное повышение солености зафиксировано в интервале глубин 100–200 м. Диффузионное взаимодействие холодного и теплого потоков течения Гольфстрим очень слабое. За время его существования ($\approx 10\,000$ лет) между этими потоками образовался промежуточный слой мощностью всего 20 см (Монин, Жихарев, 1990).

При инъекции одной вязкой жидкости в другую происходит образование «пальцев». В этом случае диффузионное смешение происходит только непосредственно на границе жидкостей: в результате образуется тонкий слой гомогенной жидкости (рис. 3). В целом система остается гетерогенной вне зависимости от того, насколько гомогенна каждая из жидкостей.

Образование расплава промежуточного состава диффузионным путем на контакте расплавов кислого и основного составов происходит со скоростью, не превышающей 0,1–0,2 м за 10^6 лет (Yoder, 1973). Расплав промежуточного состава, образовавшийся на контакте расплавов кислого и основного составов диффузионным путем, состоит из множества тонких слоев, различающихся по своему составу. Эти тонкие слои связаны постепенными

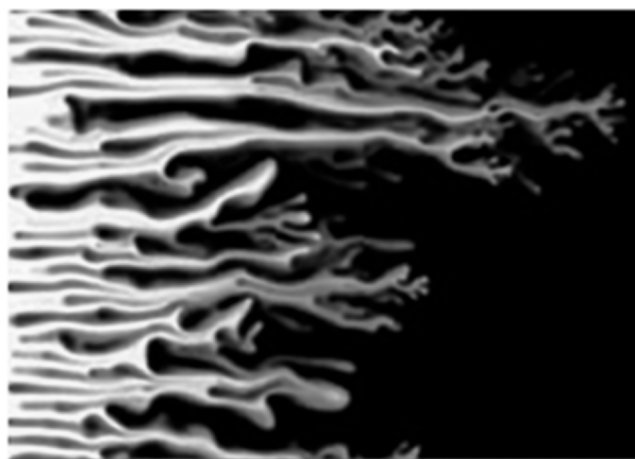


Рис. 3. Образование «пальцев» менее вязкого флюида (светлое слева) при внедрении в более вязкий флюид (черное справа). По контуру «пальцев» происходит диффузионное взаимодействие. Вне масштаба, по (Brehm, 2011)

переходами. Соответственно разница в химическом составе между непосредственно контактирующими тонкими слоями расплавов незначительна. Таким образом, диффузионный обмен веществом происходит не между исходными составами (расплавами), а между непосредственно контактирующими тонкими слоями расплавов (Соболев и др., 1997; Соболев, Курбыко, 1998; Соболев, Мальцев, 2011). Отсюда видно, что для получения значительных объемов (кубические километры) расплавов диффузионным путем требуется бесконечно большой промежуток времени.

Строение расплава

Возможность образования гомогенной смеси расплавов, как и других жидкостей, в значительной степени зависит от близости их строения. Расплав максимально разупорядочен при температуре, близкой к температуре кипения, и максимально упорядочен при температуре, близкой к температуре кристаллизации. Упорядочение расплава – это процесс объединения атомов в кластеры, которые представляют собой структурные мотивы будущих кристаллов (Белов, 1968; Гусев, 2007). Кластеры разного состава и строения (кластеры разных минералов) при одной и той же температуре имеют разную упорядоченность. Поэтому сложный по химическому составу расплав состоит из микрообъемов, имеющих и разную структуру, и разный химический состав (Жариков, 2005).

Существенно также, что даже при температуре ликвидуса вязкость расплавов кислого и среднего составов на 5–6 порядков больше, чем вязкость расплавов основного состава. Поэтому механическое перемешивание расплавов контрастного химического состава требует огромных энергетических затрат.

Экспериментальные исследования

Для изучения процесса перемешивания расплавов кислого и основного составов в процессе движения смешения были выполнены опыты при температурах 1200 и 1250°C и выдержке 6, 12, 24 и 48 часов. Тонко растертая шихта основного и кислого составов помещалась в тигли в равных объемах (по 0,5 см³). Чтобы произошло движение расплавов, шихта кислого состава помещалась внизу тигля, а основного состава – вверху. Для фиксации процесса движения расплава в шихту кислого состава были добавлены чешуйки графита. При указанных параметрах шихта плавилась, но не перемещалась. Для уменьшения вязкости в шихту кислого состава было добавлено 10 масс.% фтора. В этом случае при температуре 1250°C и длительности опытов 12 и 24 часа зафиксированы стадии



Рис. 4. Реакционное взаимодействие расплавов кислого (1) и основного (2) составов. Ширина реакционной зоны 30 мкм. Ширина изображения 100 мкм. Температура 1250°C, длительность опыта 24 часа, по (Соболев, Курбыко, 1998)

движения капель кислого расплава вверх, а капель расплава основного состава – вниз. При выдержке 48 часов основной расплав полностью перетек на дно тигля, где образовал сплошной слой. Кислый расплав переместился вверх, где также образовал сплошной слой. По ориентировке чешуек графита установлено, что это было ламинарное движение, т.е. турбулентность отсутствовала. Взаимодействие между расплавами происходило только диффузионным способом (рис. 4). В табл. 1 и 2 приведены данные о химическом составе исходной шихты и стекла реакционной зоны. Из этих данных видно, что даже на очень небольшом расстоянии расплавы реакционной зоны значительно различаются по химическому составу. Это свидетельствует о том, что взаимодействие происходило в весьма ограниченном масштабе (Соболев и др., 1997; Соболев, Курбыко, 1998).

Таблица 1

Таблица химического состава исходной шихты, %

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ
Гранит	75,06	0,20	14,54	1,89	0,64	1,79	2,28	4,49	100,89
Базальт	53,45	1,44	15,01	13,58	6,09	8,76	2,05	0,32	100,70

Таблица 2
Таблица химического состава стекол, %

Оксиды	1	1b	1a	2a	2
SiO ₂	73,32	73,01	72,39	72,26	53,25
TiO ₂	0,21	0,19	0,01	0,22	1,40
FeO	2,83	2,44	2,24	2,34	13,07
Al ₂ O ₃	14,54	15,02	15,08	16,14	15,01
MgO	0,90	0,93	1,02	1,09	5,80
CaO	2,17	2,29	2,63	2,56	7,72
Na ₂ O	2,28	2,19	2,30	2,19	2,11
K ₂ O	3,86	3,11	3,92	3,89	0,87
Σ	100,11	99,88	99,58	100,69	99,43

Примечания: 1 – стекло гранитного состава; 1b – стекло гранитного состава ближе к реакционной зоне; 1a – реакционная зона со стороны расплава гранитного состава; 2a – реакционная зона со стороны расплава базальтового состава; 2 – расплав базальтового состава. Анализы выполнены в лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на микрозондовом комплексе на базе растрового электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV» с комбинированной системой рентгено-спектрального микроанализа, объединяющей энергодисперсионный «INCA-Energy 350» и волновой дифракционный спектрометр «INCA-Wave 500» (кристаллы LiF200, TAP, PET и LSM-80 N). В стеклах содержания Cr₂O₃, MnO, P₂O₅, TiO₂ ниже предела чувствительности метода.

Геологические данные

Контакты разновозрастных, контрастных по химическому составу магматических пород описаны многократно. Однако ни в одном случае на их контакте не установлено процессов смешения. Так, например, на всех континентах широко распространены дайковые пояса, сложенные породами контрастного состава. Как правило, в пределах пояса дайки расположены параллельно друг другу, реже они располагаются одна в другой или пересекают друг друга. Геологически эти расплавы разновозрастны. Поэтому существовала возможность их взаимодействия (перемешивания и смешения). Однако это не имеет места: контакты даек разного состава резкие без признаков взаимодействия (Ефремова, 1983).

На левом берегу р. Баксан в районе г. Тырныауз (Северный Кавказ) находится субвулкан Эльджурт Сырт Баш. Он сформировался в результате четырехкратного поступления расплава. Контакты между породами разных фаз внедрения хорошо видны в обнажениях и горных выработках. Однако нигде на контактах пород разных фаз внедрения не обнаружено признаков перемешивания расплавов (Старостин и др., 1999).

На острове Лансерот (Канарский архипелаг) андезитовый вулканизм интенсивно проявился около

5 тыс. лет назад. На одном из куполов в средней части острова имеются углубления глубиной около 3 м, в которых до сих пор находится раскаленное (>300°C) андезитовое вещество. Извержения и излияния базальтовых расплавов происходили в 1872 г. За пять дней расплавы залили площадь больше 250 км². Базальты содержат обломки андезитов, однако взаимодействие между ними отсутствует. Подобные соотношения базальтов и андезитов установлены на островах Гран Канария и Фуэртевентура. На этих островах также нет взаимодействия между расплавами базальтов и андезитов (Anguita, Hernan, 2011). Химический состав оливина в нодулях в базальтах показывает, что температура базальтов была выше 1500°C. Нет взаимодействия между геологически одновременными расплавами основного и кислого составов и в других регионах (Соболев, Ламейр, 1983).

Обсуждение

Процесс механического перемешивания жидкостей возможен только при возникновении турбулентности на их границе (Ландау, Лившиц, 1986; Gouillart et al., 2009). Большая вязкость силикатных расплавов препятствует этому. Вязкость базальтового расплава при температуре ликвидуса и атмосферном давлении 10¹–10², а гранитного, соответственно, 10⁶–10⁷ пуаз (Dingwell, 1999). Таким образом, максимальное различие в их вязкостях составляет 1 млн, а минимальное – 10 тыс. раз. Добавление в гранитную шихту фтора значительно понижает вязкость кислого расплава. Однако в природных расплавах содержание фтора значительно меньше 1 масс.%, что практически исключает влияние этого фактора.

Если исходить из концепции смешения, то для образования расплава промежуточного химического состава необходимо одновременно и существование расплавов контрастного состава и их активное взаимодействие. В результате должны образовываться расплавы (в настоящее время горные породы) промежуточного химического состава. Объемы андезитов и гранодиоритов достигают сотен кубических километров. Для того чтобы могли образовываться такие объемы, необходимо существование соизмеримых объемов расплавов контрастного состава и их взаимодействие. В результате должны образовываться гетерогенные (гранодиориты) и макрогомогенные (андезиты) расплавы.

В областях, где имеются большие объемы андезитов (краевые вулканические пояса, Анды, Канарские острова, архипелаг Кергелен и др.), присутствует лишь одна составляющая: породы основного состава. Пород кислого состава там нет или они присутствуют в незначительных объемах (архипелаг Кергелен). Таким образом, на данный момент нет данных, на которых могут основываться представления о происхождении расплавов (горных пород) в геологически значимых масштабах в ре-

зультате смешения расплавов контрастного состава. Принципиально важно, что представления о смешении очень вязких сред, какими являются силикатные расплавы, противоречат законам гидродинамики (Ландау, Лившиц, 1986).

Установлено, что температура андезитовых расплавов при их излиянии на поверхность близка к 1600°C (Старостин, Кудрявцева, 1973). В области генерации температура этих расплавов была такой же или несколько выше (при подъеме часть тепла отдается во вмещающие породы). При такой высокой температуре расплав слабоупорядочен, имеет небольшую вязкость и способен к перемещению.

Оценки возможности образования макрогомогенных расплавов промежуточного состава в результате смешения исходных расплавов контрастного химического состава на основании результатов экспериментальных исследований показывают, что образование такого расплава объемом всего 1 м³ требует огромных энергетических затрат и времени, измеряемого десятками миллионов лет.

Заключение

В магматических горных породах (бывших расплавах) нередко находятся участки, отличающиеся от вмещающей горной породы по химическому и минеральному составам и по структуре. Соотношения таких участков с вмещающей породой разные. В одних случаях это обломки (ксенолиты), захваченные расплавом, двигавшимся к месту солидификации. Иногда между расплавами и ксенолитами имеются признаки слабого механического взаимодействия, однако смешения при этом не происходит.

Перемешивание жидких фаз происходит только в том случае, когда они перемещаются друг относительно друга и на их контакте возникает турбу-

лентность. В случае, когда эти фазы имеют высокую вязкость или резко отличаются по вязкости, турбулентность на их контакте не создается и, следовательно, не происходит перемешивания. Для возникновения турбулентности необходимо, чтобы скорость движения флюидов значительно различалась. Процесс перемешивания реален для газовых и воздушных потоков. Для сред с высокой вязкостью, каковыми являются силикатные расплавы, этот процесс невозможен.

Диффузионное смешение имеет место на контакте двух жидких фаз разного химического состава. В результате образуются гомогенные расплавы промежуточного химического состава. Это очень длительный процесс, который не приводит к образованию геологически значимых объемов расплавов промежуточного химического состава. Отсюда следует, что образование андезитовых расплавов объемом несколько кубических километров (объем единичного извержения) невозможно путем диффузионного смешения.

Процесс взаимодействия расплавов состоит из двух последовательных стадий: 1) механического перемешивания и 2) диффузионного смешения. В природе механическое перемешивание даже маловязких жидкостей (например, вода — вода) происходит в ограниченных масштабах. Что касается высоковязких жидкостей (расплавов), то в природе нет примеров их перемешивания.

Итак, в магматическом процессе не происходит механического перемешивания, а диффузионное взаимодействие имеет место на наномасштабе. Отсюда ясно, что в природе расплавы промежуточного состава (андезиты и др.) не могут образоваться в результате смешения. Образование макрогомогенного андезитового расплава в результате плавления протолита соответствующего состава (породы нижней континентальной коры) более вероятно.

ЛИТЕРАТУРА

- Анфилов В.Н.* Происхождение андезитов и риолитов комплементарных магматических серий // Литосфера. 2010. № 1. С. 37–46.
- Белов Н.В.* Попытки кристаллохимического вмешательства в специфические вопросы минералогии и петрографии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол. 1968. № 4. С. 78–90.
- Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М.* Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1984. 336 с.
- Гусев А.И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука. Физматлит, 2007. 416 с.
- Ефремова С.В.* Дайки и эндогенное оруденение. М.: Недра, 1983. 224 с.
- Жариков В.А.* Основы физической геохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 654 с.
- Заварицкий А.Н.* Петрография Бердяшского плутона // Тр. ЦНИГРИ. 1937. Вып. 96. 338 с.
- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 4. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- Мелешко В.В., Краснопольская Т.С.* Смешивание вязких жидкостей // Нелинейная динамика. 2005. Т. 1, № 1. С. 69–109.
- Монин А.С., Жихарев Г.М.* Океанские вихри // Усп. физ. наук. 1990. Т. 160, вып. 5. С. 1–47.
- Пуанкаре А.* Избранные труды. Т. II. М.: Наука, 1972. 383 с.
- Розенбуш Г.* Описательная петрография. Л.; М.; Грозный; Новосибирск: Горгеонефтыздат, 1934. 720 с.
- Соболев Р.Н.* Ликвация в алюмосиликатных кремнекислых расплавах (на примере гранитов и липаритов Северного Кавказа) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол. 2001. № 5. С. 27–34.
- Соболев Р.Н., Батанова А.М., Курбыко Т.А.* Экспериментальное изучение взаимодействия расплавов контрастного состава // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол. 1997. № 4. С. 43–51.
- Соболев Р.Н., Костина Р.И., Щербакова М.Н.* Жидкостная несмесимость в лавах вулкана Мунглу (Ц. Казахстан) // Докл. АН. 2001. Т. 379, № 4. С. 544–547.

Соболев Р.Н., Курбыко Т.А. Экспериментальное изучение влияния температуры на взаимодействие расплавов кислого и основного состава // Докл. АН. 1998. Т. 359, № 4. С. 532–535.

Соболев Р.Н., Ламейр Ж. Эволюция расплава нордмаркитов о. Кергелен // Докл. АН СССР. 1983. Т. 273, № 2. С. 434–437.

Соболев Р.Н., Мальцев В.В. Процесс образования расплава при нагревании кварц-полевошпатовых пород // Докл. АН. 2011. Т. 438, № 5. С. 671–674.

Старостин В.И., Кононов О.В., Соболев Р.Н., Юткин А.В. Магматизм и оруденение Тырнаузского редкометалло-полиметаллического центра // Изв. РАН. Сер. наук о Земле. 1999. № 3. С. 102–116.

Старостин В.И., Кудрявцева Г.П. Магнетитовая лава древнечетвертичного вулкана Лако (Северное Чили) // Геол. рудных месторождений. 1973. Т. 15, № 3. С. 102–112.

Anguita F., Hernan F. The Canary Island origin: a unifying model // J. Volcanol. Geothermal Res. 2011. Vol. 103. P. 1–26.

Brehm D. Mixing efficiently in confined space? Let viscous fingers do the stirring // Mass. Inst Techn. Department Civil & Environmental Engineering. May 12, 2011.

Dingwell D.B. Granitic melt viscosities // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1999. Vol. 168. P. 27–38.

Flinders J., Clemens J.D. Non-linear dynamics, chaos, complexity and enclaves in granitoid magmas // Trans. Roy. Soc. Edinburg. Earth Sci. 1996. Vol. 87. P. 217–242.

Fomin I.S., Plechov P.Yu. Exchange between mafic enclaves and host magma: Case of 1991–1995 Mount Unzen eruption // J. Earth Sci. Eng. 2012. Vol. 2. P. 631–635.

Gouillart E., Dauchot O., Thiffeault J.-L., Roux S. Open-flow mixing: Experimental evidence for strange eigenmodes // Physics Fluids. 2009. Vol. 21, N 4. P. 23–30.

Yoder H.S., Jr. Contemporaneous basaltic and rhyolitic magmas // Amer. Miner. 1973. Vol. 58, N 3/4. P. 153–171.

Сведения об авторе: *Соболев Роланд Николаевич* — докт. геол.-минерал. наук, член редколлегии журнала «Бюллетень МОИП. Отдел геологический», *e-mail: sobolev2002@gmail.com*