

ВЯЗКОСТЬ ДЕПОЛИМЕРИЗОВАННЫХ ДУНИТОВЫХ РАСПЛАВОВ ПРИ УМЕРЕННЫХ И ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

© 2018 г. Э. С. Персиков¹, *, П. Г. Бухтияров², **, А. Г. Сокол², ***

¹Институт экспериментальной минералогии РАН
Россия 142432 Черноголовка Московская обл.

²Институт геологии и минералогии СО РАН
Россия 630090 Новосибирск, просп.Академ. Коптюга, 3

*e-mail: persikov@iem.ac.ru

**e-mail: pavel@iem.ac.ru

***e-mail: sokola@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 17.10.2017 г.

Принята к печати 01.03.2018 г.

В настоящее время остался ряд неизученных проблем, особенно по концентрационной, температурной и барической зависимостям вязкости деполимеризованных ультраосновных расплавов (пироксенитовые, перидотитовые, кимберлитовые, дунитовые) при T , P -параметрах верхней мантии и земной коры. В этой работе мы приводим первые экспериментально – теоретические данные по температурной и барической зависимостям вязкости модельных дунитовых расплавов (степень деполимеризации – $100\text{NBO}/T = 340$) в широком диапазоне температур $1300\text{--}1950^\circ\text{C}$ и давлений $100\text{--}7.5$ ГПа, в сопоставлении с подобными зависимостями вязкости более полимеризованных базальтовых расплавов ($100\text{NBO}/T = 58$). Полученные экспериментальные данные по вязкости модельных дунитовых расплавов (погрешность ± 30 отн. %) сравнены с подобными расчетными зависимостями вязкости дунитовых и базальтовых расплавов, которые получены практически с экспериментальной погрешностью, с использованием усовершенствованной физико-химической модели прогноза вязкости магматических расплавов. Диапазон изменения вязкости предельно деполимеризованных дунитовых расплавов, установленный экспериментально, характеризуется очень низкими значениями вязкости как при умеренных, так и при высоких давлениях ($0.09\text{--}0.63$ Па с). Показано, что вязкость модельных дунитовых расплавов экспоненциально уменьшается с ростом температуры при умеренных (100 МПа) и высоких давлениях (до 7.5 ГПа), и напротив, экспоненциально растет с ростом давления – примерно на порядок величины с ростом давления от 100 МПа до 7.5 ГПа при постоянной температуре. Тогда как зависимость вязкости базальтовых расплавов от давления имеет экстремальный характер с минимумом при ~ 5.5 ГПа. Впервые экспериментально установлен линейный рост энергии активации вязкого течения дунитовых расплавов с ростом давления. На основе анализа новых и опубликованных результатов получена обобщенная концентрационная зависимость энергии активации вязкого течения деполимеризованных ультраосновных расплавов в полном ряду пироксенитовые – дунитовые расплавы.

Ключевые слова: вязкость, дунит, базальт, температура, давление, расплав, модель, мантия, земная кора

DOI: 10.1134/S0016752518120075

ВВЕДЕНИЕ

Для понимания многих особенностей магматических процессов, таких, например, как зарождение магм в мантии Земли, их эволюции в процессах подъема в земную кору и при вулканических извержениях, необходимо знание вязкости магматических расплавов. Проблема существования и эволюции дунитовых магм в земной коре и верхней мантии остается дискуссионной. Одни исследователи считают дуниты продуктом (кумулятом) гравитационной дифференциации базальтовых магм, другие рассматривают их как рести-

товый остаток плавления субстрата мантии. В то же время имеется и точка зрения о возможном существовании расплавов состава дунита (Иванов, 1997; Маракушев, 1988). Например, исследования Кунчевского дунит-клинопироксенит-габбрового массива на Камчатке, с привлечением данных по другим массивам, свидетельствуют о возможности образования дунитовых магм (Флеров, Полетаев, 2005). Представленные в настоящей работе результаты не дают ответа на возможность существования дунитовых магм в природе. Работа посвящена экспериментально-теоретическому ис-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и структурно-химические параметры (100NBO/T) ультраосновных и базальтовых расплавов

Компоненты	Дунит*	Дунит синтетический **	Базальт***
SiO ₂	40.6	39.85	49.2
TiO ₂	0	0	1.84
Al ₂ O ₃	0.34	2.98	15.74
Fe ₂ O ₃	1.25	0	3.79
FeO	6.35	0	7.13
MnO	0.29	0	0.20
MgO	50.53	34.11	6.73
CaO	0.46	21.68	9.47
Na ₂ O	0.07	1.38	2.91
K ₂ O	0.09	0	1.10
P ₂ O ₅	0.01	0	0.35
SO ₃	0	0	0
H ₂ O (мол.)	0	0	0.95
ОН ⁻ (кислота)	0.16	0	0
ОН ⁻ (основание)	0	0	0.48
CO ₂	0	0	0.11
CO ₃ ²⁻	0	0.2	0
F	0.15	0	0
Cl	0	0	0
Сумма	100.67	100.00	100.00
100NBO/T	377	340	58.2

* Дунит, Конжаковский массив (Иванов, Штенгельмейер, 1981); ** синтетический ультраосновной расплав, после плавления исходной смеси (Ab5Di30Mgz50Cal15, мол. %) при $T = 1400^{\circ}\text{C}$ и при давлении CO₂, равном 100 МПа (настоящая работа); *** средний состав базальта (Le Maitre, 1976).

следованию вязкости максимально деполимеризованных ультраосновных расплавов. Экспериментальные данные по концентрационной, температурной и барической зависимостям вязкости деполимеризованных ультраосновных расплавов (пироксенитовые, перидотитовые, кимберлитовые, дунитовые) при T , P -параметрах верхней мантии и земной коры немногочисленны (Иванов, Штенгельмейер, 1982; Brearley et al., 1986; Dingwell et al., 2004; Персиков, Бухтияров, 2004; Reid et al., 2003; Liebske et al., 2005; Persikov et al., 2017a), также как и теоретические (прогнозные) данные (Karki, Stixrude, 2010; Ghosh, Karki, 2011; Wan et al., 2007; Persikov, Bukhtiyarov 2009; Persikov et al., 2015). В настоящем сообщении приведены новые экспериментальные данные по температурной, и барической зависимостям вязкости де-

полимеризованных ультраосновных расплавов (модельный дунит, степень деполимеризации 100NBO/T = 340) в широком диапазоне температур 1300–1950^oC и давлений 100 МПа – 7.5 ГПа, в сопоставлении с подобными зависимостями вязкости более полимеризованных базальтовых расплавов (100NBO/T = 58). Кроме того, на основе анализа новых и опубликованных результатов, с использованием структурно-химической модели прогноза и расчета вязкости магматических расплавов (Persikov, Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2015), получена обобщенная концентрационная зависимость энергии активации вязкого течения деполимеризованных ультраосновных расплавов в полном ряду пироксенитовые – дунитовые расплавы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Необходимый состав модельного дунитового расплава (табл.) был получен при плавлении исходной смеси порошков природных минералов (Ab5Di30Mgz50Cal15, мол. %) в открытых платиновых ампулах при $T = 1400^{\circ}\text{C}$ и давлении CO₂ равном 100 МПа, с контролем баланса масс в каждом опыте. Опыты проведены с использованием уникальной установки высокого газового давления (Persikov et al., 2002). Время опытов составляло 3 час при $T = 1400^{\circ}\text{C}$ и часовой выдержке при $T = 850^{\circ}\text{C}$ для завершения субсолидусной реакции декарбонатизации (Persikov et al., 2017). Полученный таким образом состав модельного дунитового расплава (табл.) сравнивается с представительным составом природного дунита (Иванов и Штенгельмейер, 1982). А критерием сравнения является не концентрации главных породообразующих компонентов расплавов, а валовая основность таких расплавов, которая оказывает решающее влияние на их вязкость, и численно определяется с помощью структурно – химического параметра – степень деполимеризации или коэффициент основности ($K = 100\text{NBO/T}$). Этот структурно-химический параметр расплавов достаточно корректно отражает особенности валового химического состава и структуры силикатных и магматических расплавов (Persikov et al., 1990; Mysen, 1988). Очевидно, что используемый в настоящей работе состав модельного дунита строго не соответствует природным составам дунитов по концентрациям ряда породообразующих компонентов (табл.). Однако, правомерность используемого подхода при изучении вязкости магматических расплавов достаточно детально обоснована ранее (Persikov, 1998; Persikov et al., 1990). А в качестве представительного состава базальтового расплава выбран средний состав базальта, полученный в работе (Le Maitre, 1976) на основе статистического анализа более чем 3500 образцов базальтов практически из всех регионов мира (табл.).

Синтезированные таким образом образцы закаленного модельного дунитового расплава (частично раскристаллизованные стекла) диаметром 5.8 мм и высотой ~3 см извлекались из платиновых ампул. Из таких образцов вырезались 6 мм столбики стекла с плоско полированными торцами, которые вставляли в платиновые ампулы того же диаметра с плоским дном. На открытом торце столбика делали небольшие углубления, в которых размещали платина–родиевые шарики (как правило 2), накрывали торец тонкой пластиной (~0.5 мм) того же стекла, затем накрывали платиновой крышкой и герметично заваривали. Подготовленные таким образом образцы использовали для измерений вязкости расплавов. Химический состав полученных образцов модельного дунита (табл.), а также их гомогенность определяли с помощью цифрового электронного рентгеновского микроскопа Vega TS 5130MM (CamScan MV2300) с приставкой для энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 200. Для стандартизации данных микрозондовых анализов использовались программы: INCA Energy 200 и программа А.Н. Некрасова INCA.

Вязкость модельных дунитовых расплавов измеряли закалочным методом падающего шарика с использованием установок высокого давления: 1. радиационный вискозиметр высокого газового давления (Persikov, 1990; Persikov et al., 2002; Персиков, Бухтияров, 2004); 2. много пуансонный аппарат сверх высокого давления типа разрезная сфера “БАРС” (Sokol, Palyanov, 2008; Sokol et al., 2013). В опытах использованы платина – родиевые шарики (Pt60Rh40) диаметром (40–100) мкм, а скорость их падения в расплавах определялась по времени прохождения каждым шариком определенного расстояния в расплаве при необходимых значениях температуры и давления в опыте. Время измерялось с момента выхода на нужные T , P -параметры до момента изобарической закалки расплава, а расстояние, пройденное шариком в расплаве за это время, определялось в закаленных образцах под микроскопом. Температура измерялась Pt70%Rh30% – Pt94%Rh6% термодарами, которые были использованы в обоих типах установок высокого давления. Ошибки измерения температуры не превышали $\pm 5^\circ\text{C}$, для радиационного вискозиметра, а также ± 20 (при 1300°C) и $\pm 50^\circ\text{C}$ (при 1950°C) для многопуансонного аппарата “БАРС”. Как обычно, поправка, учитывающая влияние давления на ЭДС термопар, не оценивалась на аппарате “БАРС”. Относительная погрешность измерения давления на радиационном вискозиметре не превышала $\pm 1\%$, а погрешность определения давления на аппарате “БАРС” не превышала ± 0.1 ГПа. Шарики (Pt60Rh40) изготавливали плавлением тонкой платина – родиевой проволоки с закалкой в воде. Диаметры и сферичность

получаемых шариков измеряли с помощью микроскопа до и после измерений вязкости расплавов.

Вязкость расплавов при заданных T , P -параметрах опыта рассчитывалась по известному закону Стокса с поправкой Факсена на пристеночный эффект (Persikov, 1998):

$$h = 2gr^2Dr/9V(1 + 3.3r/h) \times \left[1 - 2.104r/r_a + 2.09(r/r_a)^3 - 0.95(r/r_a)^5 \right], \quad (1)$$

где: r – радиус шарика, см; r_a – внутренний радиус платиновой ампулы с расплавом, см; h – высота ампулы, см; g – ускорение земного притяжения, 981 см/сек^2 ; $\Delta\rho$ – разность плотностей, шарика и расплава, г/см^3 ; V – скорость падения шарика в расплаве, см/сек ; η – вязкость расплава при T , P -параметрах опыта, 0.1 Па с или пуазы.

Плотность расплавов принималась равной плотностям закаленных в изобарических условиях расплавов – стекло, плотности которых получены методом гидростатического взвешивания после экспериментов при умеренных (100 МПа) и высоких давлениях (5.5 и 7.7 ГПа). Получены следующие значения плотности расплавов (стекло): $\rho = 3.0 \text{ г/см}^3$ ($P = 100 \text{ МПа}$), $\rho = 3.23 \text{ г/см}^3$ ($P = 5.5 \text{ ГПа}$), $\rho = 3.3 \text{ г/см}^3$ ($P = 7.5 \text{ ГПа}$). Последующая корректировка плотности расплавов по температуре не превышала 1% (Персиков, Бухтияров, 2004). А с учетом существенно большей плотности платина родиевых шариков (17.85 г/см^3), расчетная погрешность определения $\Delta\rho$ в уравнение (1) не превышала $\pm 5\%$, что хорошо согласуется с результатами подобных расчетов в работе (Liebske et al., 2005). Рассчитанная суммарная погрешность измерений вязкости расплавов не превышала ± 30 отн. %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурная зависимость вязкости

Полученные экспериментальные результаты по температурной зависимости вязкости исследованных расплавов свидетельствуют, что температурная зависимость вязкости близиквидусных деполимеризованных дунитовых и более полимеризованных базальтовых расплавов при умеренном и высоких давлениях достаточно корректно описывается известным теоретическим уравнением Аррениуса–Френкеля–Эйринга (Persikov, 1998; Персиков, Бухтияров, 2004; Persikov et al., 2015):

$$\eta_T^P = \eta_0 \exp(E_X^P/RT), \quad (2)$$

где $\eta_0 = 10^{-4.5} \pm 10^{-0.1} \text{ Па}$ с – предэкспоненциальный множитель, характеризующий вязкость расплава при $T \rightarrow \infty$ [Persikov et al., 1990]; T – температура (К); R – универсальная газовая постоянная – Дж/моль К ; E_X^P – энергия активации

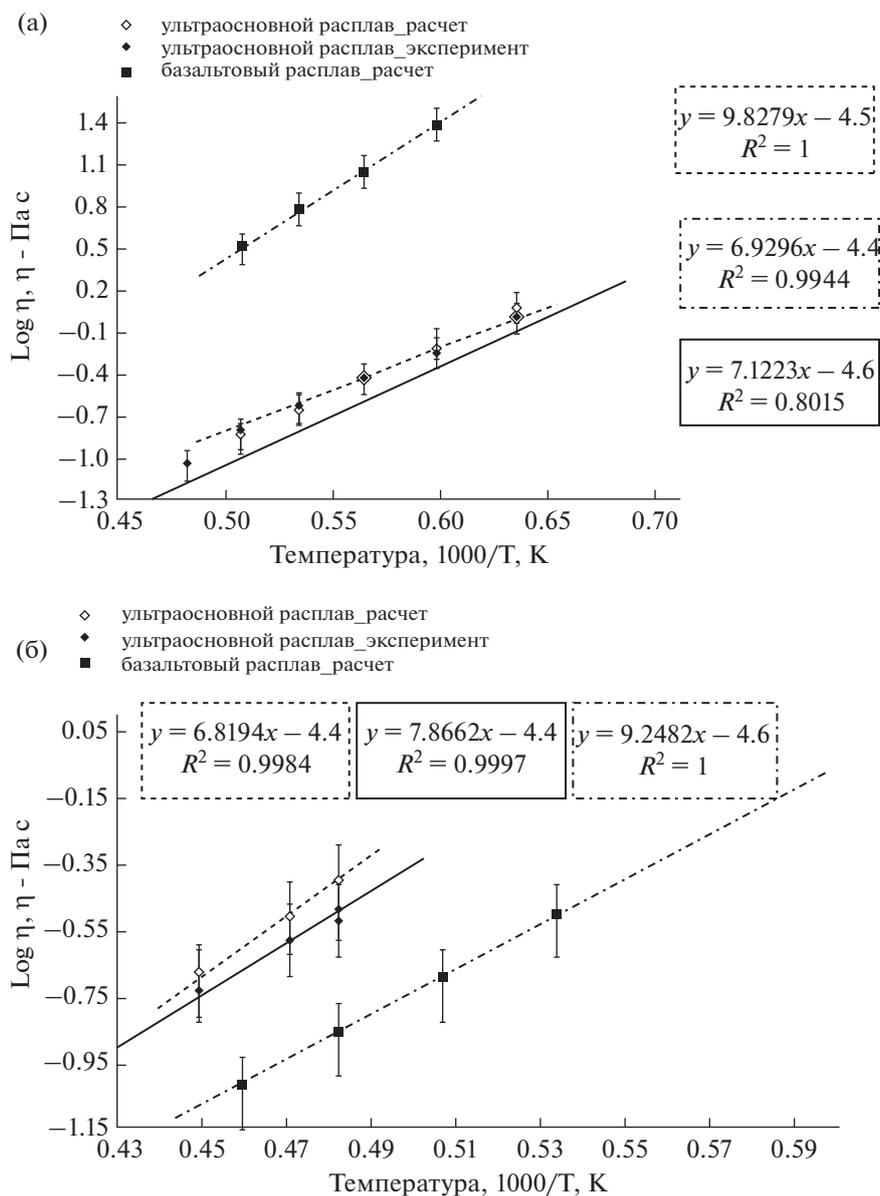


Рис. 1. Температурные зависимости вязкости дунитовых и базальтовых расплавов (погрешность экспериментальных и расчетных данных ± 30 отн. %, расчетные данные по температурным зависимостям вязкости расплавов приведены по модели (Persikov E., S. Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2015), а) давление $\text{CO}_2 = 100$ МПа, б) литостатическое давление = 5.5 ГПа.

вязкого течения (Дж/моль), которая является функцией давления и состава расплава; η_T^P — вязкость расплава при данной температуре и давлении (Па с).

Известно, что энергия активации вязкого течения является важнейшей энергетической и структурно-химической характеристикой жидкого состояния, имеющая ясный физический смысл как потенциальный барьер или изменение свободной энергии системы в процессе течения (Френкель, 1975; Persikov et al., 1990; Persikov, 1998). На рисунке 1 приведены темпе-

ратурные зависимости вязкости модельных дунитовых расплавов при умеренном (100 МПа) и высоком давлении (5.5 ГПа) в сравнении с температурной зависимостью вязкости основных (базальт) расплавов. В соответствии с уравнением (2), температурная зависимость вязкости изученных расплавов является экспоненциальной, т.е. вязкость этих расплавов экспоненциально уменьшается с ростом температуры, и напротив, экспоненциально растет с уменьшением температуры как при умеренном давлении (100 МПа, рис. 1а), так и при высоких литостатических давлениях

(5.5 ГПа, рис. 1б). Также установлено постоянство предэкспоненциального множителя (η_0) уравнения (2) и его независимость от состава расплава, температуры и давления (см. уравнения, приведенные на диаграммах рис. 1а, рис. 1б), что полностью соответствует теоретическим выводам (Френкель, 1975) и ранее полученным данным при умеренных и высоких давлениях (Persikov et al., 1990; Persikov, 1998; Персиков, Бухтияров, 2004; Persikov et al., 2017a). На этой основе впервые с высокой точностью получены корректные и независимые от температуры значения энергий активации вязкого течения этих расплавов. Дунитовые расплавы: $E = 137 \pm 1.37$ кДж/моль ($P = 100$ МПа) и $E = 171 \pm 1.7$ кДж/моль ($P = 7.5$ ГПа); базальтовые расплавы – $E = 186 \pm 1.86$ кДж/моль ($P = 100$ МПа), и $E = 153 \pm 1.53$ кДж/моль ($P = 7.5$ ГПа). При этом доказан линейный рост энергии активации вязкого течения дунитовых расплавов с увеличением давления и инверсионный характер зависимости энергии активации вязкого течения базальтовых расплавов от давления ($E = 143 \pm 1.43$ кДж/моль – минимальное значение при $P = 5.5$ ГПа). Очевидно, что такая высокая точность определения энергий активации вязкого течения (± 1.0 отн. %) недостижима при непостоянстве (η_0) в уравнении (2), что характерно для многих исследований вязкости магматических расплавов, в которых (η_0) в уравнении (2) принималась непостоянной. Например, в работе (Liebske et al., 2005) измерена вязкость синтетического перидотитового расплава в диапазоне давлений 2.8–13.0 ГПа с использованием многопуансонного аппарата, скомбинированного с источником синхротронного рентгеновского излучения. В этой работе приводится расчетное и постоянное значение энергии активации вязкого течения перидотитовых расплавов (108 ± 23 кДж/моль, погрешность ± 21 отн. %) в широком диапазоне литостатических давлений (0–8 ГПа). Это не соответствует нашим предыдущим работам (Persikov, 1990; Persikov, 1998; Персиков, Бухтияров, 2004; Persikov et al., 2017a) и результатам настоящей работы. Полученные в настоящей работе экспериментальные данные по температурной зависимости вязкости модельных дунитовых расплавов при умеренных и высоких давлениях (погрешность ± 30 отн. %) сравнены с расчетными температурными зависимостями их вязкости, которые получены практически с экспериментальной погрешностью, с использованием нашей усовершенствованной физико-химической модели прогноза вязкости магматических расплавов (рис. 1). Этот важный результат является убедительным доказательством правомерности применения структурно-химической модели (Persikov, Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2015) и для прогнозных расчетов вязкости деполимеризованных магматических расплавов при T, P -па-

раметрах, которые не использовались в экспериментах.

Зависимость вязкости расплавов от давления

Давление является важнейшим термодинамическим параметром магматических систем, и включая эффузивную фацию глубинности, высокие давления являются характерной особенностью существования магматических расплавов в недрах Земли. Во всех теориях вязкости жидкости, несмотря на различные исходные концепции, получен качественно единый вывод об увеличении вязкости жидкостей с ростом давления по экспоненциальному закону, который записывается следующим образом:

$$\eta^P = \eta_0 \exp(E + PDV)/RT, \quad (3)$$

где η^P – вязкость жидкости при давлении P , ΔV – объем активации (положительная величина). В ряде работ установлена аномальная и экстремальная зависимость вязкости магматических расплавов в ряду кислые-основные от давления (рис. 2 – базальт) (Brearley et al., 1986; Персиков, Бухтияров, 2004 и др.). Тогда как для деполимеризованных ультраосновных расплавов зависимость их вязкости от давления соответствует теоретическому уравнению (3), т.е. с ростом давления вязкость таких расплавов экспоненциально растет (до $P \leq (10-12)$ ГПа). Пример такой зависимости приведен на рисунке 2 в сравнении с экстремальной зависимостью вязкости базальтовых расплавов от давления. Из анализа этих результатов следует, что вязкость модельных дунитовых расплавов экспоненциально растет в изотермических условиях ($T = 1800^\circ\text{C}$) почти на порядок величины с ростом давления от 100 МПа до 7.5 ГПа. Новые экспериментальные данные по барической зависимости вязкости модельных дунитовых расплавов сравнены с подобными зависимостями вязкости водосодержащих базальтовых расплавов (рис. 2), которые получены с использованием нашей структурно-химической модели прогноза и расчетов вязкости магматических расплавов (Persikov, Bukhtiyarov 2009; Persikov et al., 2015). Установлено впервые, что вязкость модельных дунитовых расплавов при умеренном давлении ($P = 100$ МПа) на более чем один порядок величины меньше вязкости базальтовых расплавов при соизмеримых значениях температуры. В то же время при высоких давлениях ($P = 5.5-7.5$ ГПа) происходит изменение барической зависимости вязкости базальтовых расплавов, и вязкость модельных дунитовых расплавов, напротив, становится больше вязкости базальтовых расплавов примерно на 0.5 порядка величины. При этом зависимость вязкости базальтовых расплавов от давления в изотермических условиях ($T = 1800^\circ\text{C}$) имеет инверсионный характер с минимумом при

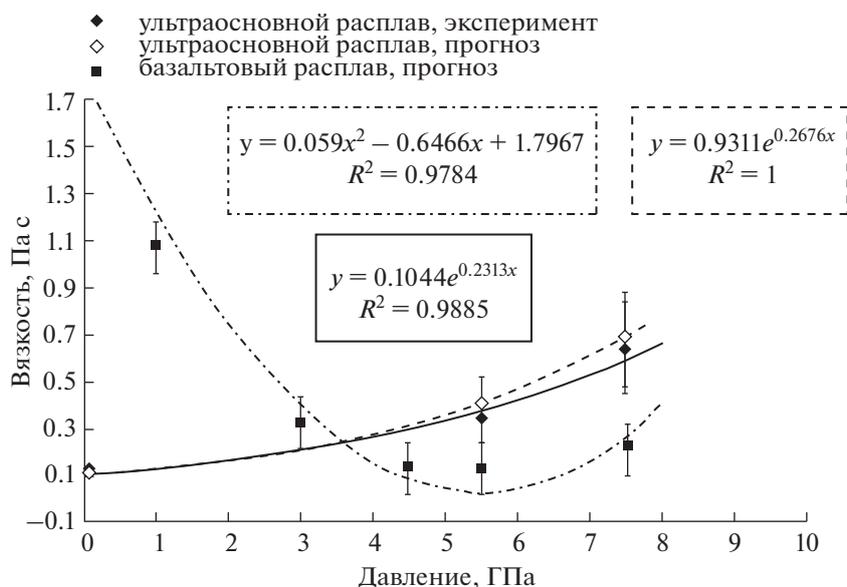


Рис. 2. Изотермические (1800°C) зависимости вязкости ультраосновных (модельный дунит) и основных (базальт) расплавов от давления (погрешность экспериментальных и расчетных данных = ± 30 отн. %).

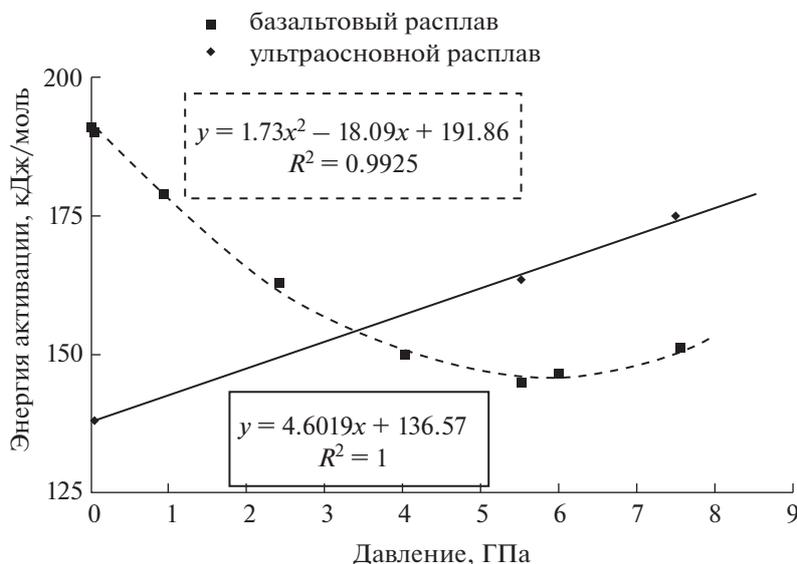


Рис. 3. Зависимость энергии активации вязкого течения деполимеризованных ультраосновных (дунит) и основных (базальт) расплавов от литостатического давления.

$P \approx 5.5$ ГПа. На рисунке 3 приведена корректная зависимость энергии активации вязкого течения дунитовых расплавов от давления в сравнении с подобной зависимостью для базальтовых расплавов, которая впервые получена на основе анализа экспериментальных данных. Из нее следует, что энергия активации вязкого течения деполимеризованных модельных дунитовых расплавов линейно и значительно растет с ростом давления. Отметим характерную особенность: энергия ак-

тивации вязкого течения деполимеризованных ультраосновных расплавов увеличивается примерно на 40% с ростом давления от атмосферного до 7.5 ГПа (рис. 3), что свидетельствует о важности учета этой зависимости для таких расплавов.

Концентрационная зависимость вязкости

Из всех физико-химических свойств силикатных и магматических расплавов вязкость наиболее сложно зависит от состава жидкости и ее

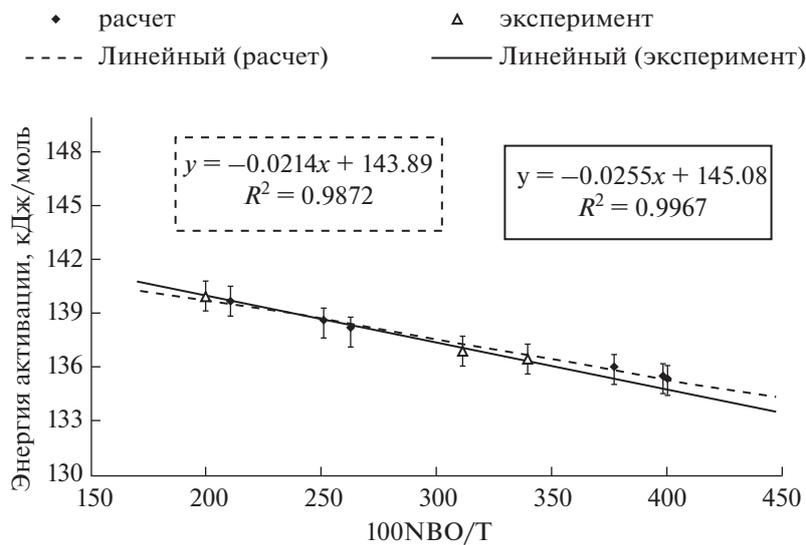


Рис. 4. Концентрационная зависимость энергий активации вязкого течения деполимеризованных ультраосновных расплавов при $P = 100$ МПа (диопсид, $100\text{NBO}/T = 200$ (Персиков, Бухтияров, 2004; Brearley et al., 1986; Reid et al., 2003); меймечит, $100\text{NBO}/T = 210$ (состав по Иванов, Штенгельмейер, 1982); перидотит, $100\text{NBO}/T = 250$ (состав по Dingwell et al., 2004; Reid et al., 2003); гарцбургит, $100\text{NBO}/T = 263$ (состав по Иванов, Штенгельмейер, 1982); модельный кимберлит, $100\text{NBO}/T = 312$ (Persikov et al., 2015); модельный дунит, $100\text{NBO}/T = 340$ (настоящая работа); дунит, $100\text{NBO}/T = 377$ (состав по Иванов, Штенгельмейер, 1982)).

структуры, с чем в первую очередь связаны трудности создания методов расчета и прогнозирования. Степень чувствительности вязкости к изменению состава магматических расплавов наглядно характеризуют, например, следующие данные: в ряду гранит–дунит вязкость близкижидусных расплавов уменьшается на огромную величину, приблизительно в 10^8 раз. Нами эта сложная проблема достаточно корректно была решена на основе структурно-химического подхода с использованием теоретического уравнения (2), что подробно изложено в ряде работ (Persikov, 1998; Persikov, Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2015). Был использован критерий, который адекватно и с надлежащей чувствительностью отражает структуру и состав силикатных и магматических расплавов. В современном понимании это структурно-химический параметр расплава ($100\text{NBO}/T$) – степень деполимеризации (процент разорванных связей в структуре) или коэффициент относительной основности, упомянутый выше. Было также доказано, что ввиду существенно разных температур ликвидуса магматических пород изотермическое сопоставление вязкости магм разного состава нередко не имеет физико-химического смысла, например, гранит–дунитовые расплавы, и что правильнее сравнивать энергии активации вязкого течения, как не зависящей от температуры структурно-химической и реологической характеристики расплавов. На основе доказанного постоянства η_0 в уравнениях (2) и (3) были получены новые корректные значения энергий активации вязкого те-

чения близкижидусных ультраосновных магматических расплавов, и получена обобщенная концентрационная зависимость энергий активации вязкого течения от состава расплава (рис. 4). Отметим, что энергия активации вязкого течения деполимеризованных ультраосновных расплавов уменьшается незначительно (примерно на 4 отн. %) в ряду пироксенитовые – перидотитовые – кимберлитовые – дунитовые расплавы (рис. 4). Это свидетельствует о слабой зависимости их реологических свойств от состава расплава, несмотря на значительное изменение их степени деполимеризации в этом ряду основности расплавов (пироксенитовые расплавы, $100\text{NBO}/T \sim 200$; дунитовые расплавы, $100\text{NBO}/T \sim 400$). Важно также, что все расчетные данные энергий активации вязкого течения таких расплавов, приведенные на этой диаграмме, получены по физико-химической модели (Persikov, Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2015) с высокой точностью (± 1 отн. %).

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что зависимость вязкости модельных дунитовых и базальтовых расплавов от температуры и давления соответствует экспоненциальной зависимости в широком диапазоне температур (1300–1950°C) и давлениях до 7.5 ГПа. Впервые установлены достоверные значения энергий активации вязкого течения модельных дунитовых расплавов при умеренных и высоких давлениях. Доказан линейный рост энергий акти-

вации вязкого течения модельных дунитовых расплавов с увеличением давления и инверсионный характер барической зависимости энергий активации вязкого течения базальтовых расплавов с минимумом при $P \sim 5.5$ ГПа.

2. Впервые получена обобщенная концентрационная зависимость энергий активации вязкого течения от состава расплава в полном ряду деполимеризованных магматических расплавов (пироксенитовые—дунитовые).

3. Установлено, что при соизмеримых значениях температуры вязкость ультраосновных дунитовых расплавов при умеренных давлениях (100 МПа) почти на порядок величины меньше вязкости основных базальтовых расплавов, тогда как при высоких давлениях (5–7.5 ГПа), напротив, больше более чем в 2 раза, что обусловлено установленными особенностями влияния давления на вязкость таких расплавов.

Авторы признательны Некрасову А.Н. (ИЭМ РАН) за помощь при проведении анализов образцов на микрозонде.

Исследования проведены при поддержке РФФИ, грант № 15-05-01318, и частично, при поддержке РНФ, грант № 14-27-00054.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов О.К., Штенгельмейер С.В. (1982) Вязкость и температура кристаллизации расплавов ультрамафитов. *Геохимия* (3), 330-337.
- Иванов О.К. (1997) Концентрически зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург: Ур. ГУ, 448 с.
- Маракушев А.А. (1988) *Петрогенезис*. М.: Недра, 294 с.
- Персиков Э.С., Бухтияров П.Г. (2004) Экспериментальное исследование влияния литостатического и водного давлений на вязкость силикатных и магматических расплавов. Новая структурно-химическая модель расчета и прогноза их вязкости. *Экспериментальная минералогия, некоторые итоги на рубеже столетий*. (Под ред. В.А. Жарикова, В.В. Федькина). М.: Наука, 1, 103-122.
- Флеров Г.Б., Полетаев В.А. (2005) Петрология Кунчевского дунит-клинопироксенит габбрового массива Центральной Камчатки. *Вулканология и сейсмология* (3), 1-14. 1140.
- Френкель Я.И. (1975) Кинетическая теория жидкостей. М.: Изд-во АН СССР, 592 с.
- Brearley M., Dickinson J. E. Jr, Scarfe M. (1986) Pressure dependence of melt viscosities on the join diopside – albite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **30**, 2563-2570.
- Dingwell D.B., Copurtial P., Giordano D., Nichols A.R.L. (2004) Viscosity of peridotite liquid. *Earth Planet. Sci. Lett.* **226**, 127-138.
- Ghosh D. and Karki B. (2011) Diffusion and viscosity of Mg₂SiO₄ liquid at high pressure from first-principles simulations. *Geochim. Cosmochim. Acta* **75**, 4591-4600. <http://dx.doi.org/doi.10.1126/science.1188327>
- Karki B.B. and Stixrude L.P. (2010) Viscosity of MgSiO₃ at Earth's mantle conditions: implications for an early magma ocean. *Science* **328**, 740-742. <http://dx.doi.org/doi.10.1016/j.gca.2011.05.030>
- Le Maitre R.W. (1976) The chemical variability of some common igneous rocks. *J. Petrol.* **17**(4), 589-637.
- Liebske C., Schmickler B., Terasaki H., Poe B.T., Suzuki A., Funakoshi K.I., Ando R. Rubie D.C. (2005) The viscosity of peridotite liquid at pressures up to 13 GPa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **240**, 589-604. <http://dx.doi.org/doi.10.1016/j.gca.2011.05.030>
- Mysen B.O. (1988) *Structure and properties of silicate melts*. Amsterdam: Elsevier, 354 p.
- Persikov E.S., Zharikov V.A., Bukhtiyarov P.G., and Pol'skoy S.F. (1990) The effect of volatiles on the properties of magmatic melts. *Eur. J. Mineral.* **2**, 621-642.
- Persikov E.S. (1998) Viscosities of model and magmatic melts at the pressures and temperatures of the Earth's crust and upper mantle. *Russ. Geol. Geophys.* **39**(11), 1780-1792.
- Persikov E.S. & Bukhtiyarov P.G. (2002) Unique gas high pressures apparatus to study fluid-melts and fluid-solid-melts interaction with any fluid composition at the temperature up to 1400°C and at the pressures up to 5 kbars. *J. Conf. Abs.* **7**(1), 85.
- Persikov E.S. & Bukhtiyarov P.G. (2009) Interrelated structural chemical model to predict and calculate viscosity of magmatic melts and water diffusion in a wide range of compositions and *T-P* parameters of the Earth's crust and upper mantle. *Russ. Geol. Geophys.* **50**(12), 1079-1090.
- Persikov E.S., Bukhtiyarov P.G., Sokol A.G. (2015) Change in the viscosity of kimberlite and basaltic magmas during their origin and evolution (prediction). *Russ. Geol. Geophys.* **56**, 885-892.
- Persikov E.S., Bukhtiyarov P.G., Nekrasov A.N., Sokol A.G. (2017) Interaction of orthopyroxenes with carbonates at the Earth's crust and mantle conditions. *Abstract gold2017: abs:2017001255*.
- Persikov E.S., Bukhtiyarov P.G., Sokol A.G. (2017a) Viscosity of hydrous kimberlite and basaltic melts at high pressures. *Russ. Geol. Geophys.* **58**, 1093-1100.
- Reid J.E., Suzuki A., Funakoshi K.I., Terasaki H., Poe B.T., Rubie D.C., Ohtani E. (2003) The viscosity of CaMgSi₂O₆ liquid at pressures up to 13 GPa. *Phys. Earth Planet. Int.* **2003**, **139**, 45-54.
- Sokol A.G., Palyanov Y.N. (2008) Diamond formation in the system MgO–SiO₂–H₂O–C at 7.5 GPa and 1600°C. *Contr. Miner. Petrol.* **121**, 33-43.
- Sokol A.G., Kupriyanov I.N., Palyanov Y.N. (2013) Partitioning of H₂O between olivine and carbonate-silicate melts at 6.3 GPa and 1400°C: Implications for kimberlite formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* **383**, 58-67.
- Wan J.T.K., Duffy T.S., Scandolo S., Car R. (2007) First-principle study of density, viscosity and diffusion coefficients of liquid MgSiO₃ at conditions of the Earth's deep mantle. *J. Geophys. Res.* **112**, 1-7.