

УДК 552.11

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ МАСС ГРАНИТОВ И РИОЛИТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ С ЗАКОНОМЕРНОСТЯМИ РЕОЛОГИИ ГРАНИТОИДНЫХ МАГМ

Э.С. Персиков

*Институт экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН  
ул. Академика Осипяна, 4, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия  
E-mail: persikov@iem.ac.ru*

Поступила в редакцию 03.02.2019 г.  
Получена после доработки 07.03.2019 г.  
Принята к печати 19.04.2019 г.

Продemonстрированы новые закономерности вязкости близиквидусных водосодержащих гранитоидных магм в широком диапазоне температур и глубин земной коры с использованием структурно-химической модели, способной прогнозировать и рассчитывать вязкость магмы практически любого состава с учетом содержания различных флюидных компонентов и наличия кристаллов и пузырей флюида в магме. Эти закономерности действительно являются количественной физико-химической основой, объясняющей причину относительной распространенности масс интрузивных и эффузивных пород кислого состава в земной коре.

**Ключевые слова:** вязкость, водосодержащие магмы, гранит, земная кора, закономерности, структурно-химическая модель, температура, давление

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-5903275496-502>

### ВВЕДЕНИЕ

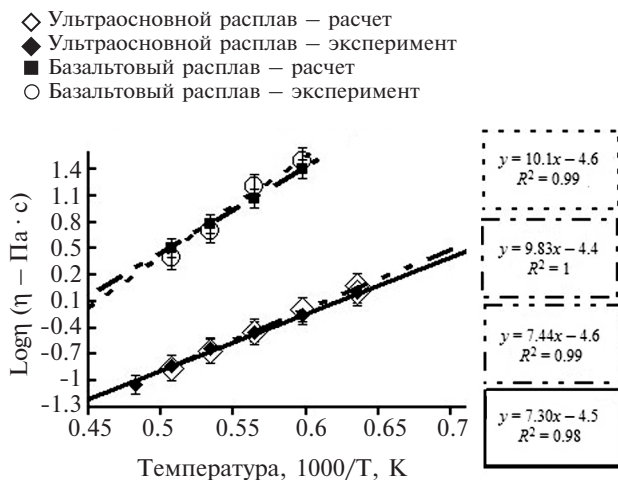
Вопрос количественных соотношений между кислыми plutonicкими и вулканическими породами (П : В) до настоящего времени остается дискуссионным, несмотря на значительный объем петрологических, геохимических, геохронологических, геофизических наблюдений и результатов термодинамического моделирования (например, Winkler, 1962; Харрис и др., 1972; Crisp, 1984; Lipman, 1984; Shaw, 1975; Glazner et al., 2015; Lundstrom, Glazner, 2016 и ссылки в этих работах). Основная проблема, возникающая при определении соотношений интрузивных и эффузивных пород в конкретном вулcano-плутоническом комплексе, заключается в следующем. Во-первых, во многих случаях plutonicкие породы выглядят очень похожими на связанные с ними вулканические породы. Во-вторых, часто вулканические породы не сохраняются, благодаря процессам разрушения и эрозии. В очень немногих районах Земли можно наблюдать совместно как вулканические, так и непосредственно связанные с ними plutonicкие породы. Характерным примером та-

кого комплекса кислых пород является супервулкан Йеллоустоун в США. Геофизические исследования свидетельствуют о том, что там находится примерно  $32800 \pm 4200 \text{ км}^3$  гранитной plutonicкой породы (Christiansen, 2001 и др.). Объем вулканических пород, образовавшихся в Йеллоустоне за последние 2.2 млн лет, составляет от 3550 до 7250  $\text{км}^3$ . Сравнение объемов plutonicких и вулканических пород (П : В) для поля Йеллоустоун дает довольно неопределенное соотношение между 4 : 1 и 10 : 1. Основными факторами, которые коррелируют с наблюдаемым в природе объемным соотношением plutonicких и вулканических пород в земной коре, являются: состав магмы, степень ее кристалличности и флюидо-насыщенности, потенциал кислорода  $fO_2$ , толщина коры, тектоническая обстановка и региональное напряжение (например, Winkler, 1962; Харрис и др., 1972; Луканин, 1985; Di Genova et al., 2017). Соотношения объемов интрузивных и экструзивных образований обычно около 5 : 1 для океанической коры и 10 : 1 для континентальной коры. Эта

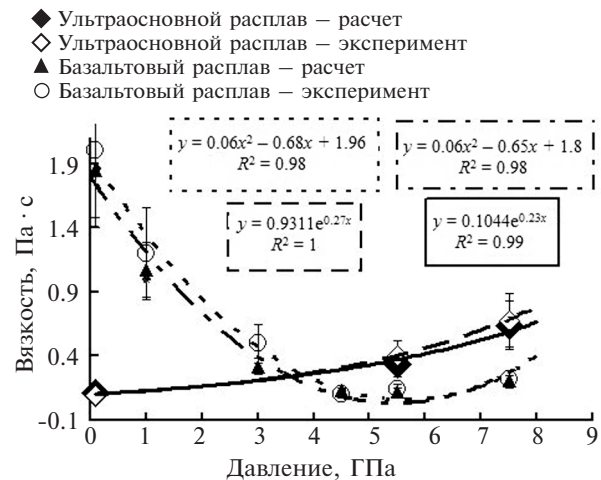
разница, по-видимому, отражает неодинаковую скорость подъема магмы, связанную с различной толщиной коры и составом магмы (например, Winkler, 1962; Харрис и др., 1972; Marsh, 1981). В обзорной работе (White et al., 2006), на основе анализа объемов плутонических и вулканических пород более чем в 170 магматических провинциях Земли, авторы, с одной стороны, констатируют такую же неопределенность в этом вопросе, а с другой стороны, отмечают систематическую и значимую корреляцию соотношения  $P:V$  с составом магмы, а следовательно с ее вязкостью. Известно, что именно вязкость в значительной степени определяет характер перемещения магматических расплавов в земной коре и верхней мантии, текстурные особенности интрузивов и эффузивов и многие другие особенности магматических пород (Заварицкий, Соболев, 1961; Соболев, 1973; Персиков, 1984; Persikov, 1991 и др.). В.С. Соболев (1973) предложил общую схему вертикального перемещения магм в земной коре и в верхней мантии, образовавшихся при различных значениях литостатического ( $P_{\text{лит.}}$ ) и флюидного ( $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ) давления, и обосновал невозможность излияния магм с содержанием воды в них более 1–2 мас.% при соотношении  $P_{\text{H}_2\text{O}}/P_{\text{лит.}} \sim 0.1$ . Он предположил, что причина относительной распространенности масс интрузивных и эффузивных пород в земной коре кроется в закономерностях вязкости водосодержащих магм в переменном поле температур

и давлений. Вязкость магм является сложной функцией химического и фазового состава, структуры и степени кристалличности, летучести кислорода  $fO_2$ , температуры, давления, содержания летучих компонентов, прежде всего воды и ее форм растворения в расплаве. В результате исследований в ИЭМ РАН и в различных лабораториях мира на протяжении более трех десятков лет автором разрабатывалась физико-химическая модель, позволяющая рассчитывать вязкость гетерогенных магм практически любого состава, от гранитных до ультраосновных, в условиях земной коры и верхней мантии (Persikov, 1991, 1998, 2007; Persikov et al., 1990; Persikov, Bukhtiyarov, 2009 и ссылки в этих работах). Модель позволила прогнозировать вязкость магматических расплавов как функцию следующих параметров: 1) температуры, 2) литостатического и флюидного давлений, 3) структуры и химического состава расплава, включая летучие компоненты ( $H_2O$ ,  $OH^-$ ,  $CO_2$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $F^-$ ,  $Cl^-$ ), 4) летучести кислорода, определяемой через соотношение  $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ , 5) соотношения катионов:  $Al^{3+}/(Al^{3+} + Si^{4+})$ ,  $Al^{3+}/(Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Fe^{2+})$ , 6) объемного содержания кристаллов и пузырей (до 45 об.%) с использованием простой компьютерной программы.

Соотношение прогнозных и экспериментальных данных для водосодержащих гранитоидных расплавов детально рассматривалось ранее (Персиков, 1984; Persikov, 1991, 1998; Persikov et al., 1990). На рис. 1 и 2 в качестве



**Рис. 1.** Температурные зависимости вязкости ультраосновных (модельный дунит) и базальтовых расплавов при давлениях флюида ( $P_{\text{фл.}}$ ) = 100 МПа, базальтовый расплав;  $P_{\text{CO}_2}$  = 100 МПа, ультраосновной расплав. Погрешность экспериментальных и расчетных данных  $\pm 30$  отн.% (Persikov, 1998; Persikov, Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2018).



**Рис. 2.** Изотермические (1800°C) зависимости вязкости базальтовых и ультраосновных (модельный дунит) расплавов от давления (погрешность экспериментальных и расчетных данных  $\pm 30$  отн.% (Persikov, 1998; Persikov, Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2018)).

дополнительного примера достоверности прогноза вязкости магм по этой модели приведено сравнение новых экспериментальных и расчетных данных по температурной и барической зависимости вязкости ультраосновных (модельный дунит) и базальтовых расплавов в широком диапазоне температур (1300–1950°C) и давлений (0.1–7.5 ГПа) в земной коре и верхней мантии.

Из приведенных данных следует, что даже для таких экстремальных температурных, барических и композиционных условий данные по вязкости расплавов, полученные по модели, очень хорошо соответствуют экспериментальным результатам в пределах оговоренных погрешностей.

На основе значительного объема экспериментально-теоретических данных достоверно установлено, что из широкого спектра флюидных компонентов кислых магм ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) решающее влияние на их текучесть оказывает вода, растворяющаяся в магмах в двух формах. Растворение воды в расплаве в виде гидроксила  $\text{OH}^-$  сильно снижает вязкость и значительно увеличивает степень деполимеризации (основность) расплава. Предельная емкость гранитоидного расплава для  $\text{OH}^-$  составляет 6.4 мас.% (Персиков, 1984; Persikov, 1998). Растворение воды в расплаве в виде молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , наоборот, слабо снижает вязкость кислого расплава, не меняя его основности, а псевдобинарная система гранитоидная магма–вода с хорошей степенью приближения моделирует реологическое поведение таких магм во всем диапазоне глубин земной коры. Проблема достоверного определения соотношения  $\text{OH}^-/\text{H}_2\text{O}$  в гранитоидных расплавах при различных температурах и давлениях остается дискуссионной (Stolper, 1982; Персиков, 1984; Бернэм, 1983; Кадик и др., 1971; Хитаров и др., 1963). Наши экспериментально-теоретические результаты, а также данные, полученные в ряде других работ (Бернэм, 1983; Nowak, Behrens, 1995), подтверждают упомянутую предельную емкость гранитоидных расплавов по отношению к  $\text{OH}^-$  при высоких температурах. Вместе с тем известно, что в закаленных расплавах (стеклах), полученных при изобарической закалке водосодержащих кислых расплавов (гранит, альбит), особенно при  $P_{\text{H}_2\text{O}} \geq 200$  МПа, преобладает молекулярная  $\text{H}_2\text{O}$  (Stolper, 1982; Персиков, 1984; Persikov, 1991, 1998; Persikov et al., 1990; Nowak, Behrens, 1995 и ссылки в этих работах).

Экспериментально установлена аномаль-

ная барическая зависимость вязкости гранитоидных магм. Их вязкость значительно снижается с ростом литостатического и водного давлений (Kushiro, 1981; Brearley et al., 1986; Giordano et al., 2004; Mysen, 1991; Scarfe et al., 1987; Persikov, 1991, 1998, 2007; Persikov et al., 1990). Ввиду того, что отсутствуют геологические доказательства существенного перегрева кислых магм в различных фациальных условиях земной коры, были выполнены расчеты вязкости таких магм по нашей модели при термодинамических параметрах их субликвидусов, установленных в ряде работ (Перчук, 1973; Кадик и др., 1971) во взаимосвязи со структурой расплавов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Видоизмененное уравнение Аррениуса–Френкеля–Эйринга (Persikov, 1998, 2007; Persikov et al., 2018) используется в работе для расчетов концентрационной, температурной и барической зависимостей вязкости системы гранитоидная магма–вода:

$$\eta_T^P = \eta_0 \exp(E_X^P/RT), \quad (1)$$

где  $E_X^P$  – (Дж/моль) энергия активации вязкого течения, которая является функцией состава магматического расплава, концентрации форм растворенной воды в нем ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) и давления;  $\eta_T^P$  – вязкость магмы при данной температуре и давлении (Па·с);  $\eta_0$  – предэкспоненциальная константа (Па·с), характеризующая вязкость расплава при  $T \rightarrow \infty$  ( $\log \eta_0 = -4.5 \pm 0.14$ );  $T$  – температура (К);  $R = 8.3192$  (Дж/моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Для характеристики особенностей химического состава и структуры магм в работе используется параметр ( $100\text{NBO}/T$ ), который определяется из химического состава расплава, выраженного в мас.% оксидов, включая летучие компоненты ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  и др.), с использованием следующего уравнения:

$$100\text{NBO}/T = 200(O - 2T)/T, \quad (2)$$

где  $O$  – суммарное количество грамм-ионов немостиковых кислородов в расплаве (non-bridging oxygen),  $T = (\text{Al}^{3+} + \text{Si}^{4+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+} + \text{P}^{5+} + \text{B}^{3+})$  – суммарное количество грамм-ионов сеткообразователей, находящихся в тетраэдрической координации по кислороду и входящих в анионную часть структуры расплава. Пример расчета этого параметра для водосодержащего гранитного расплава приведен в ряде

работ (например, Персиков, 1984; Persikov, 1991, 1998; Persikov et al., 1990). Было доказано, что этот параметр, названный степенью деполимеризации или коэффициентом основности магм, адекватно и с наибольшей чувствительностью отражает структуру и состав магм (Персиков, 1984; Persikov, 1991, 1998, 2007). Необходимо подчеркнуть, что для гранитоидных магм этот параметр изменяется от 0 до 17 (рис. 3), тогда как часто используемый в западной литературе похожий параметр  $NBO/T$  (Mysen, 1991) близок к 0 для полимеризованных гранитоидных расплавов и, следовательно, не способен отражать особенности химизма и структуры полимеризованных гранитоидных магм (Персиков, 1984; Persikov, 1991; Di Genova et al., 2017). Параметр  $100NBO/T$  не имеет подобного недостатка, так как для гранитоидных расплавов, особенно водосодержащих, изменяется в широких пределах (см. ниже табл. 2). Была также получена обобщенная структурно-химическая зависимость энергии активации вязкого течения магматических расплавов, согласно которой весь диапазон составов природных магм делится на четыре интервала с разной величиной энергии активации и, соответственно, вязкости в зависимости от состава и структуры магмы (Persikov, 1998, 2007):

- 1) полностью полимеризованные кислые магмы,  $0 \leq 100NBO/T \leq 17$ ,
- 2) частично деполимеризованные средние-основные магмы,  $17 \leq 100NBO/T \leq 100$ ,
- 3) деполимеризованные основные-ультраосновные магмы  $100 \leq 100NBO/T \leq 200$ ,
- 4) полностью деполимеризованные ультраосновные магмы  $200 \leq 100NBO/T \leq 400$ .

Очевидно, что энергия активации вязкого течения и вязкость расплава (см. уравнение 1) значительно уменьшаются с ростом основности полимеризованных кислых магм (см. рис. 3). Необходимо также отметить, что для таких расплавов их энергии активации, а следовательно, и вязкость существенно снижаются с ростом отношения  $Al^{3+}/(Al^{3+} + Si^{4+})$ , т.е. при переходе от силикатных (расплав кварца) к алюмосиликатным расплавам (рис. 3), что впервые удалось учесть при расчетах вязкости по предложенной модели.

Влияние кристаллической фазы на вязкость гетерогенного расплава рассчитывается в модели с использованием эмпирического уравнения:

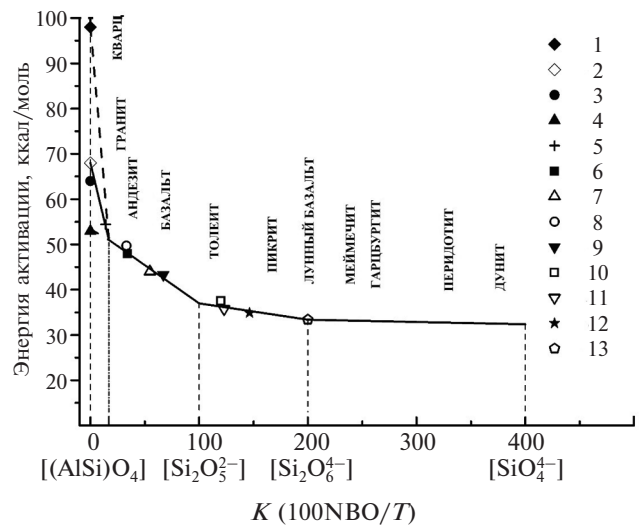
$$\eta_{\text{гет.}} = \eta_0 (1 - V_{\text{кр.}})^{-3.35}, \quad (3)$$

где  $\eta_0$  — вязкость жидкой фазы,  $V_{\text{кр.}}$  — объемная доля кристаллической фазы.

**Таблица 1.** Химический состав (мас.%) и структурно-химический параметр ( $100NBO/T$ ) исходного гранитного расплава

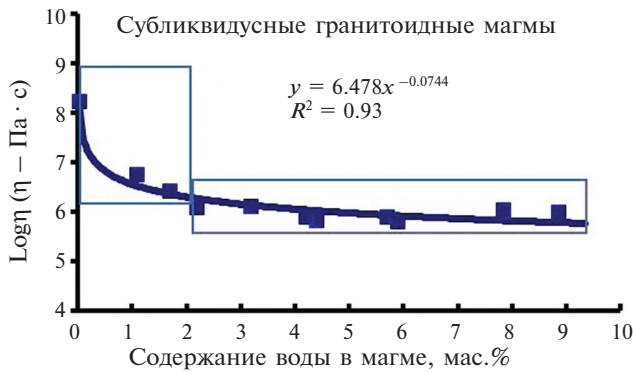
Компоненты	Гранит*
SiO <sub>2</sub>	72.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.48
FeO	1.11
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MnO	0.06
MgO	0.39
CaO	1.14
Na <sub>2</sub> O	3.55
K <sub>2</sub> O	4.3
TiO <sub>2</sub>	0.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07
Li <sub>2</sub> O	0
H <sub>2</sub> O (мол.)	1.1
OH <sup>-</sup> (осн.)	0.31
CO <sub>2</sub>	0.08
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	
F	
Сумма	99.65
100NBO/T	5.93

*Примечание.* \* Средний состав гранитов по (Le Maitre, 1976).



**Рис. 3.** Обобщенная структурно-химическая зависимость энергий активации вязкого течения модельных и магматических расплавов (в квадратных скобках приведены основные структурные анионы расплавов (Persikov, 1998)).

1 —  $Qz_{100}$ , 2 —  $Ab_{100}$  (модельный гранит), 3 —  $Jd_{10}$ , 4 —  $Ne_{100}$ , 5 —  $Ab_{93}(H_2O)_7$ , 6 —  $Ab_{85}(H_2O)_{15}$ , 7 —  $Ab_{75}(H_2O)_{25}$ , 8 —  $Ab_{80}Di_{20}$ , 9 —  $Ab_{57}Di_{43}$ , 10 —  $Ab_{30}Di_{70}$ , 11 —  $Di_{92}(H_2O)_8$ , 12 —  $Di_{96}(H_2O)_4$ , 13 —  $Di_{100}$  (состав расплавов — мол. %).



**Рис. 4.** Закономерности вязкости субликвидусных ( $T = T_{\text{лик.}} - 50^\circ\text{C}$ ) водосодержащих гранитных магм в условиях земной коры:  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 0\text{--}300$  МПа,  $P_{\text{лит.}}$  — до 1000 МПа,  $T = 620\text{--}925^\circ\text{C}$ , содержание кристаллов и пузырей в магме до 25 об.%, степень деполимеризации  $100\text{NBO}/T = 3.5\text{--}54$ ).

Отдельное влияние пузырей флюидной фазы на вязкость гетерогенного расплава удовлетворительно описывается следующим эмпирическим уравнением:

$$\eta_{\text{гет.}} = \eta_0 (1 - 1.5V_{\text{фл.}})^{-0.55}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{фл.}}$  — объемная доля пузырей флюидной фазы в жидкости (Persikov et al., 1990; Persikov, 1998, 2007; Persikov, Bukhtiyarov, 2009; Persikov et al., 2018). В качестве представительного состава кислых пород выбран средний состав гранита (риолита), основанный на более чем 2800 анализах (Le Maitre, 1976) составов гранитов из практически всех регионов мира (табл. 1).

На рис. 4 приведена диаграмма вязкость— $\text{H}_2\text{O}$  для системы гранитный расплав—вода

при температурах субликвидуса гранита ( $T = T_{\text{лик.}} - 50^\circ\text{C}$ ) в широком интервале давлений.

При ее построении использованы экспериментально-теоретические результаты исследований термодинамических параметров плавления гранита в присутствии водяного пара (Лебедев, Хитаров, 1964; Хитаров и др., 1963; Кадик, 1971; Персиков, 1984; Перчук, 1973; Бернэм, 1983), а вязкость расплавов в этих условиях рассчитана по предложенной модели (см. табл. 2).

Анализ представленных результатов (табл. 2, рис. 4) показывает, что гранитные магмы с содержанием воды от 2 до 9 мас.% являются достаточно подвижными расплавами в широком диапазоне  $P$ - $T$  параметров. Сравнительно невысокая вязкость водонасыщенных гранитных магм ( $\sim 10^{5.9}$  Па·с) и практически полная независимость вязкости магм в этих условиях от содержания воды в них (см. выделенную область на рис. 4) и, соответственно, от степени их деполимеризации ( $100\text{NBO}/T = 19\text{--}54$ ) определенно указывают на возможность гомогенизации в земной коре на различных глубинах больших масс плутонических гранитоидных батолитов и лополитов путем конвекции, флюидно-магматического массопереноса и последующей их кристаллизации. Полученные результаты (табл. 2, рис. 4) доказывают также принципиально иные закономерности вязкости недосыщенных водой гранитоидных магм при низком содержании воды в них ( $\leq 2$  мас.%, см. выделенную область

**Таблица 2.** Вязкость ( $\eta_T^P$ ) и структурно-химические параметры ( $100\text{NBO}/T$ ) водосодержащих сублидусных гранитоидных магм при термодинамических параметрах земной коры

$P_{\text{лит.}},$ МПа	$P_{\text{H}_2\text{O}},$ МПа	$\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O},$ мас.%	$T, ^\circ\text{C}$	$100\text{NBO}/T$	$V_{\text{кр.}} + V_{\text{пуз.}},$ об.%	$\text{Log } \eta_T^P \pm 30 \text{ отн. } \%$ ( $\eta_T^P - \text{Па} \cdot \text{с}$ )
$P_{\text{лит.}} > P_{\text{H}_2\text{O}}; T = T_{\text{лик.}} - 50^\circ\text{C}$						
10	1	$0.02 \pm 0$	925	3.5	$10 \pm 0$	8.22
50	30	$1.0 \pm 0.1$	875	11.4	$10 \pm 0$	6.75
60	40	$1.5 \pm 0.2$	800	15.4	$10 \pm 0$	6.42
100	50	$2.9 \pm 0.3$	750	26.4	$10 \pm 0$	6.12
500	100	$4.0 \pm 0.4$	730	35.1	$10 \pm 0$	5.82
800	200	$5.19 \pm 0.5$	680	44.6	$10 \pm 0$	5.88
1000	300	$6.4 \pm 1.45$	620	54.1	$10 \pm 10$	6.10
500	100	$3.83 \pm 0.4$	730	33.8	$10 \pm 0$	5.90
800	200	$5.4 \pm 0.5$	680	46.2	$10 \pm 0$	5.80
1000	300	$6.4 \pm 2.45$	620	54.1	$10 \pm 15$	6.00

на рис. 4). Они отражают многие особенности кислого магматизма в эффузивной и субвулканической фациях. При почти полной дегидратации гранитоидных магм их вязкость возрастает на три порядка и достигает значений  $\sim 10^8\text{--}10^9$  Па·с, а степень деполимеризации значительно снижается ( $100\text{NBO}/T$  от 19 до 3.5, см. табл. 2). При такой вязкости полимеризованные гранитоидные магмы не способны течь в виде лавовых потоков, а извергаются сравнительно редко в виде экструзий или взрывных катастрофических извержений. Основная же масса таких гранитоидных магм не достигнет поверхности Земли, их кристаллизация будет происходить в плутонической фации.

### ВЫВОДЫ

1. Получены достоверные закономерности вязкости и структуры близкидусных водосодержащих гранитоидных магм в широком интервале термодинамических параметров, соответствующих земной коре. Тем самым на количественной физико-химической основе обоснованы возможные диапазоны и пределы перемещения таких магм на различных гипсометрических уровнях в земной коре.

2. Установленные закономерности вязкости суббликвидусных водосодержащих гранитоидных магм количественно подтверждают на физико-химической основе предположение В.С. Соболева (1973) о взаимосвязи вязкости водосодержащих магм с относительной распространенностью в земной коре масс интрузивных и эффузивных кислых пород, т.е. наблюдаемое в природе широкое распространение в земной коре масс интрузивных гранитов по сравнению с массами эффузивных риолитов.

**Благодарности.** Автор признателен П.Г. Бухтиярову (ИЭМ РАН) за сотрудничество в экспериментах, обсуждение результатов и критические замечания. Автор благодарен Е.Б. Лебедеву и О.А. Луканину (ГЕОХИ РАН) за ценные замечания по работе, способствовавшие улучшению качества первоначальной версии статьи.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке программы № 19 Президиума РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бернэм К.У.* Значение летучих компонентов // Эволюция изверженных пород. Под ред. Х. Йодера. М.: Мир, 1983. С. 425–467.
- Заварицкий А.Н., Соболев В.С.* Физико-химические основы петрографии изверженных горных пород. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 383 с.
- Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И.* Вода в магматических расплавах. М.: Наука, 1971. 267 с.
- Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И.* Начало плавления гранита и электропроводность его расплава в зависимости от высокого давления паров воды // Геохимия. 1964. № 3. С. 195–201.
- Луканин О.А.* О причинах бимодального распределения пород вулканических серий // Геохимия. 1985. № 3. С. 348–359.
- Персиков Э.С.* Вязкость магматических расплавов. М.: Наука, 1984. 160 с.
- Перчук Л.Л.* Термодинамический режим глубинного петрогенезиса. М.: Наука, 1973. 318 с.
- Соболев В.С.* Строение верхней мантии и способы образования магм. М.: Наука, 1973. 34 с.
- Харрис П., Кеннеди У., Скарф К.* Соотношение вулканизма и плутонизма в свете вариаций химического состава горных пород // Механизм интрузий магмы. М.: Мир, 1972. С. 160–173.
- Хитаров Н.И., Лебедев Е.Б., Кадик А.А.* Растворимость воды в расплаве гранитного состава при давлениях до 7000 атм // Геохимия. 1963. № 10. С. 957–959.
- Brearley M., Dickinson J.E.Jr., Scarfe M.* Pressure dependence of melt viscosities on the join diopside – albite // Geochim. Cosmochim. Acta. 1986. V. 30. P. 2563–2570.
- Christiansen R.L.* The Quaternary and piocene Yellowstone Plateau volcanic field of Wyoming, Idaho, and Montana // US Geol. Survey Prof. Paper. 2001. V. 729. P. 1–146.
- Crisp J.A.* Ratios of magma emplacement and volcanic output // J. Volcan. Geothermal Res. 1984. V. 20. P. 177–211.
- Di Genova D., Kolzenburg S., Wiesmaier S., et al.* A compositional tipping point governing the mobilization and eruption style of rhyolitic magma // Letter. Nature. 2017. V. 552. P. 235–238.
- Giordano D., Romano C., Papale P., Dingwell D.B.* The viscosity of trachytes, and comparison with basalts, phonolites, and rhyolites // Chem. Geol. 2004. V. 213. № 1–3. P. 49–61.
- Glazner A.F., Coleman D.S., Mills R.D.* The volcanic-plutonic connection // Eds. C. Breitkreuz and S. Rocchi. Physical Geology of Shallow Magmatic Systems: Dykes, Sills, and Laccoliths. New York: Springer International Publishing, 2015. P. 1–22.
- Kushiro I.* Viscosity, density and structure of silicate melts at high pressures, and their petrological applications // Ed. R.B. Hargraves. Physics of Magmatic Processes. New Jersey: Princeton University Press, 1980. P. 93–120.

- Lipman P.W.* The roots of ash-flow calderas in western North America: Windows into the tops of granitic batholiths // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 8801–8841.
- Lundstrom C.C., Glazner A.F.* Silicic magmatism and the volcanic – plutonic connection // *Elements*. 2016. V. 12. P. 91–96.
- Le Maitre R.W.* The chemical variability of some common igneous rocks // *J. Petrol.* 1976. V. 17. № 4. P. 589–637.
- Marsh B.* On the crystallinity, probability of occurrence, and rheology of lava and magma // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1981. V. 78. № 1. P. 85–98.
- Mysen B.O.* Relation between structure, redox equilibria of iron, and properties of magmatic liquids // Eds. L.L. Perchuk, I. Kushiro. *Physical chemistry of magmas*. Adv. Phys. Geochem. New York: Springer-Verlag, 1991. V. 9. P. 41–98.
- Nowak M., Behrens H.* The speciation of water in haplogranitic glasses and melts determined by in situ near-infrared spectroscopy // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. № 16. P. 3445–3450.
- Persikov E.S.* The viscosity of magmatic liquids: experiment, generalized patterns; a model for calculation and prediction; application // Eds. L.L. Perchuk, I. Kushiro. *Physical chemistry of magmas*. Adv. Phys. Geochem. New York: Springer-Verlag, 1991. V. 9. P. 1–40.
- Persikov E.S.* The viscosity of model and magmatic melts under *P-T* parameters of the Earth's crust and upper mantle // *Russian Geology and Geophysics*. 1998. V. 39. № 12. P. 1780–1792.
- Persikov E.S.* Structural chemical model to calculate and predict the viscosity of magmatic melts in full range of composition and conditions // *General Assembly EGU-2007*. Vienna. *Geophysical Research Abstracts*. 2007. V. 9. A-02262. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-02262.
- Persikov E.S., Bukhtiyarov P.G.* Interrelated structural chemical model to predict and calculate viscosity of magmatic melts and water diffusion in a wide range of compositions and *P-T* parameters of the Earth's crust and upper mantle // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. V. 50. № 12. P. 1079–1090.
- Persikov E.S., Zharikov V.A., Bukhtiyarov P.G., Pol'skoy S.F.* The effect of volatiles on the properties of magmatic melts // *Eur. J. Mineral.* 1990. V. 2. P. 621–642.
- Persikov E.S., Bukhtiyarov P.G., Sokol A.G.* Viscosity of depolymerized dunite melts under medium and high pressures // *Geochemistry International*. 2018. V. 56. № 12. P. 1148–1155.
- Scarfe C.M., Mysen B.O., Virgo D.* Pressure dependence of the viscosity of silicate melts // Ed. B.O. Mysen. *Magmatic Processes: Physicochemical Principles*. *Chemochem. Soc. Spec. Publ.* 1987. V. 1. P. 59–68.
- White S.M., Crisp J.A., Spera F.J.* Long – term volumetric eruption rates and magma budgets // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. V. 7. № 3. P. 1–20.
- Shaw H.* Links between magma-tectonic rate balances, plutonism, and volcanism // *J. Geophysical Research*. 1975. V. 90. P. 11, 275–11,288.
- Stolper E.M.* Water in silicate glasses: an infrared spectroscopic study // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1982. V. 81. P. 1–17.
- Winkler H.G.F.* Viel basalt und wenig gabbro – und wenig rhyolith und viel granit // *Beiträge zur Mineralogie und Petrographie*. 1962. V. 8. P. 222–231.

## THE RELATIONSHIP OF THE RELATIVE ABUNDANCE OF MASSES OF GRANITES AND RHYOLITES IN THE EARTH'S CRUST WITH THE REGULARITIES OF THE RHEOLOGY OF THE GRANITIC MAGMAS

**E.S. Persikov**

*D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences  
142432, Chernogolovka, Moscow district, Russia*

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

Many years ago, V.S. Sobolev suggested that the reason for the relative prevalence of intrusive and effusive rock masses in the earth's crust lies in the regularities of viscosity of water-bearing magmas in a variable field of temperatures and pressures. Alas, in those years it was not possible to solve this problem on a quantitative physical-chemical basis, since experimental and theoretical studies of the viscosity of such melts at high pressures were just beginning. In the present work, new regularities of the viscosity of near-liquid water-bearing acidic magmas in a wide range of thermodynamic parameters and depths of the Earth's crust (1–30 km) is established using the structural-chemical model of reliable and correct predictions and calculations of the viscosity of magmas of virtually any composition. It determined that these regularities really are a quantitative physical-chemical basis explaining the reason for the relative distribution of masses of intrusive and effusive rocks of acidic composition in the earth's crust.

**Keywords:** Viscosity, water-bearing magmas, granite, Earth's crust, regularities, structural-chemical model, temperature, pressure.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-5903275496-502>