



<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0247>

## NUMERICAL SIMULATION OF MAGMA MINGLING (CASE OF BAYANKOL GABBRO-GRANITE SERIES, SANGILEN, TUVA)

O. P. Polyansky<sup>1,2</sup>, A. N. Semenov<sup>1,2</sup>, V. G. Vladimirov<sup>1,2</sup>,  
I. V. Karmysheva<sup>1,2</sup>, A. G. Vladimirov<sup>1,2,3</sup>, V. A. Yakovlev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russia

**Abstract:** A new numerical model has been developed that makes it possible to describe the process of formation of a dyke of a combined composition on the basis of the dynamics of a viscous compressible fluid. The numerical thermo-mechanical model shows the processes of magma mingling and taking into account multiphase interaction of melts which are different in composition and properties. The models suggest a mechanism for uplifting of high-density mafic enclaves in a chamber/dyke filled with salic magma by gravitational floating in the enclosing granite magma that has been cooled and lost volatile components. The performed simulation shows that the main parameter controlling the shape and size of the ascending bodies is the difference in densities. The viscosity contrast determines whether interpenetration and hybridization of magmas occur. The limiting ratio of felsic material in the mixture, which is capable of uplifting denser mafic enclaves, is estimated. The duration of melt uplifting in combined dykes is estimated with respect to the viscosity parameters. At a typical rate of 2–3 km per year, it amounts to almost 12 months.

**Key words:** magma mingling; mixing; convection; melt; viscosity; crystallization; numerical modeling; combined dyke

### RESEARCH ARTICLE

Recommended by E.V. Sklyarov

Received: November 7, 2016

Revised: February 16, 2017

Accepted: February 24, 2017

**For citation:** Polyansky O.P., Semenov A.N., Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Vladimirov A.G., Yakovlev V.A., 2017. Numerical simulation of magma mingling (case of Bayankol gabbro-granite series, Sangilen, Tuva). *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (2), 385–403. doi:10.5800/GT-2017-8-2-0247.

**Для цитирования:** Полянский О.П., Семенов А.Н., Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Владимиров А.Г., Яковлев В.А. Численная модель магматического минглинга (на примере Баянкольской габбро-гранитной серии, Сангилен, Тува) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 2. С. 385–403. doi:10.5800/GT-2017-8-2-0247.

**On-line supplementary materials:** Animation files phase2-basic.mpeg; phase2zoom-basic.mpeg; phase3-syenite.mpeg

**Дополнительные материалы (on-line):** Анимационные файлы phase2-basic.mpeg; phase2zoom-basic.mpeg; phase3-syenite.mpeg

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА (НА ПРИМЕРЕ БАЯНКОЛЬСКОЙ ГАББРО-ГРАНИТНОЙ СЕРИИ, САНГИЛЕН, ТУВА)

О. П. Полянский<sup>1,2</sup>, А. Н. Семенов<sup>1,2</sup>, В. Г. Владимиров<sup>1,2</sup>,  
И. В. Кармышева<sup>1,2</sup>, А. Г. Владимиров<sup>1,2,3</sup>, В. А. Яковлев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

**Аннотация:** Впервые разработана численная модель, позволяющая описывать процесс формирования дайки комбинированного состава на основе динамики вязкой сжимаемой жидкости, а также численная термомеханическая модель процессов магматического минглинга, учитывающая многофазное взаимодействие разных по составу и свойствам расплавов. На основе моделирования предложен механизм подъема высокоплотных базитовых включений в камеру или дайке, заполненной салической магмой, путем гравитационного всплытия во вмещающей гранитной магме, охлажденной и потерявшей летучие компоненты. Выполненное моделирование показывает, что основным параметром, контролирующим форму и размер поднимающихся тел, является разность плотностей. В свою очередь, контрастность вязкости определяет, происходит ли взаимопроникновение и гибридизация магм. Установлено предельное содержание доли кислого материала в смеси, способного транспортировать вверх более плотные базитовые включения. В зависимости от параметров вязкости оценена длительность подъема расплавов в комбинированных дайках, которая составляет около года при характерной скорости 2–3 км/год.

**Ключевые слова:** магматический минглинг; смешение; конвекция; расплав; вязкость; кристаллизация; численное моделирование; комбинированная дайка

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В составе гранитоидных батолитов и малых интрузий Центральной Азии известны многочисленные примеры проявления магматического минглинга. Их характерной чертой является наличие в породах сетчато- жильных структур, отражающих смешение базитовых, салических и/или гибридных магматических расплавов. К природным примерам таких объектов можно отнести Бургасский кварцсиенитовый массив в Западном Забайкалье [Burmakina, Tsygankov, 2013], Тастаускую вулканоплутоническую структуру в Восточном Казахстане [Dokukina et al., 2010], гранитоидные массивы баянкольской габбро-гранитной серии на Западном Сангилене [Vladimirov et al., 2005; Karmysheva et al., 2015, 2017] и др. Для многих проявлений минглинга, как правило, имеется разнообразная петрологическая, структурная и геохронологическая информация. Однако физико-химическая характеристика самих процессов взаимодействия магм при формировании сложных интрузивов описывается лишь на качественном уровне, что явно недостаточно. Для построения согласованных флюидо-термоконвективных моделей комбинированных даек требуется количественная оценка параметров их формирования, включающих параметры среды, а также физико-химические свойства базитовой,

гранитной магм и продуктов их гибридизации [Bohrson et al., 2014; Spera et al., 2016].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования магматического минглинга и его верификации на примере плутонических комбинированных даек в Нижнеэрзинском гранитоидном массиве баянкольской габбро-гранитной серии (Западно-Сангиленский фрагмент коллизионного орогена, Тувино-Монгольский массив, ЦАСП).

### 2. ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Комбинированные интрузии являются следствием взаимодействия мантийных базитовых магм с гранитоидными расплавами различного происхождения. Как следует из представлений [Spera et al., 2016], взаимодействие контрастных по составу расплавов происходит с участием двух принципиально разных физико-химических процессов: минглинга и гибридизации. Их различие заключается в следующем. В процессе магматического минглинга образуется гетерогенная смесь, содержащая отдельные порции исходных магм. Как следствие, производная магма содержит дискретные массы каждого типа магм, распределенные гетерогенно внутри интрузивного тела.

Гибридизация (или миксинг) включает в себя термодинамическое уравнивание двух и более различных по составу исходных магм с образованием в пределе химически и физически однородной смеси.

При плутоническом минглинге возможно полистадийное внедрение базитовых и средних по составу расплавов в ранее сформировавшуюся силикатную магматическую камеру. Например, для Усть-Хилокского массива (Забайкалье) насчитывается не менее шести стадий [Litvinovsky et al., 1995]. В мигматитовом комплексе Чилан (Провинция Бассейнов и Хребтов, США) выделяют пять фаз базит-ультрабазитового магматизма [Hopson, Mattinson, 1994]. В разработанной численной модели для лучшего понимания рассматривается одна фаза инъекции смеси расплавов в камеру, заполненную ранее гранитной магмой. Модель может быть легко модифицирована для описания процесса многократного внедрения магм, как это описано в приведенных выше примерах.

Численные физико-химические модели, опубликованные ранее, в основном являются термодинамическими [Bohrson et al., 2014; Spera et al., 2016] и реже – термомеханическими, т.е. учитывающими реологию и течение магмы [Petrelli et al., 2006; Gutierrez, Parada, 2010; Simakin, Bindeman, 2012]. В моделях, описывающих вещественную зональность магматических резервуаров, отдельные фазы часто определяются минеральным либо химическим составом. Это позволяет в конвективных моделях дать представление о сложной картине эволюции магматических систем. Так, в работе [Gutierrez, Parada, 2010] в результате двухмерного термогидродинамического и масс-балансового моделирования приведена реконструкция эволюции вещественного состава при охлаждении магматической камеры в форме штока и силла. Модельные результаты показывают, как перераспределяются минеральные фазы в двухмерном сечении камеры на разных стадиях эволюции многофазной среды. В частности, показано, что конвективная динамика характеризуется тремя разными типами течений в процессе охлаждения камеры: 1) потоками в конвективных ячейках, 2) массопереносом в форме плюмов и 3) потоками в пограничных слоях вдоль стенок камеры. Распределение содержания кремнезема и магнезиальности магмы, как показывает моделирование, имеет непрерывный зональный вид без каких-либо неоднородностей, характерных для процессов магматического минглинга.

В работе [Simakin, Bindeman, 2012] было проведено моделирование эвтектического плавления кровли вулканической кальдеры (фаза 1) при повторном внедрении перегретого риолитового расплава (фаза 2). Плавление рассматривалось с уче-

том диаграммы плавкости системы Ab–Qz–Qt в псевдобинарном сечении «полевой шпат – кварц». В этом подходе дифференциация и контаминация внедрившегося расплава определяются по изменению содержания SiO<sub>2</sub>. Результаты моделирования позволяют сделать следующие основные выводы: 1) конвекция приводит к перемешиванию вещества и аномалиям температуры; 2) опускающиеся плюмы инициируют конвективные течения в пределах пограничного с кровлей слоя; плавление сопровождается «эрозией» кровли, т.е. отрывом кусков вещества кровли и вовлечением их в процесс ассимиляции; 3) на конвективный режим слабо влияет вариация состава магм (по содержанию SiO<sub>2</sub>), но более значимой оказывается степень кристаллизации в разных частях камеры. В верхних частях наблюдается максимум кристалличности погружающихся плюмов, которая снижается ввиду полного растворения в центральной части магматической камеры.

В перечисленных работах, а также в обзорах современных подходов к моделированию эволюции магматических камер [Bohrson et al., 2014; Spera et al., 2016] модели, описывающие процессы магматического минглинга и миксинга, не приводятся.

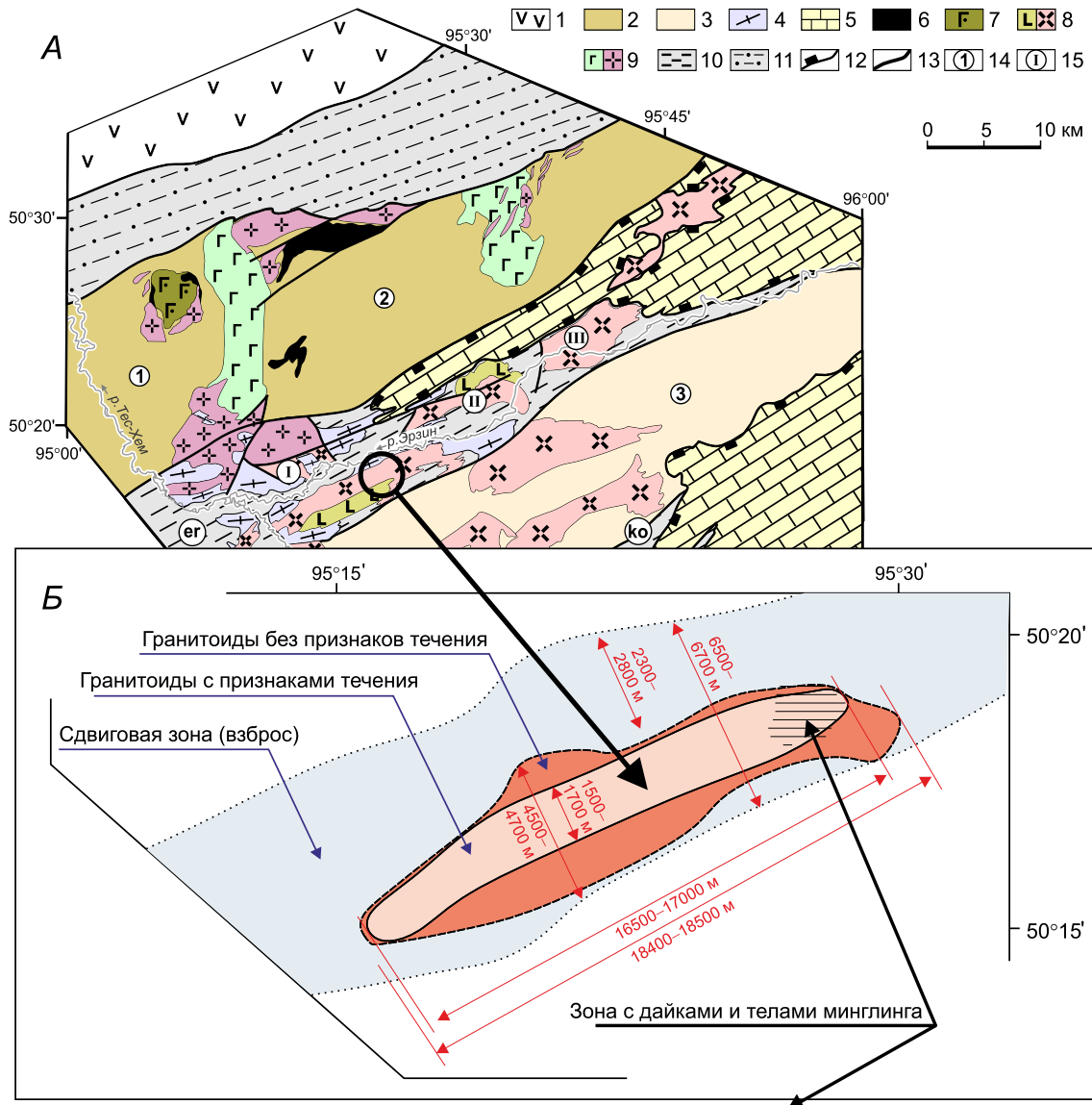
### 3. ОБОСНОВАНИЕ ПЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для того чтобы перейти от качественных характеристик эволюции магм к количественным, в работе использованы численные модели, разработанные на основе динамики вязкой жидкости и учитывающие экспериментальные зависимости свойств от температуры, давления, состава и содержания летучих компонентов [Semenov, Polyansky, 2017]. В то же время конечной целью настоящей работы является верификация численной модели магматического минглинга на природных объектах. В связи с этим граничные условия численной модели изначально опирались на параметры проявлений магматического минглинга на Западном Сангилене (Юго-Восточная Тува).

#### 3.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

В качестве опорного объекта для моделирования минглинг-процессов выбрана комбинированная дайка в гранитоидах Нижнеэрзинского массива<sup>1</sup>. Последний приурочен к Эрзинской тектониче-

<sup>1</sup> Тектоническая и геодинамическая характеристика региона приведена в настоящем спецвыпуске журнала в работе В.Г. Владимирова и др. «Термохронология минглинг-даек Западного Сангилена (ЮВ Тува): свидетельства развала коллизионной системы на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива».



ской зоне и относится к баянкольской габбро-гранитной серии. Вмещающими породами являются мигматит-граниты эрзинского метаморфического комплекса.

Нижнеэрзинский массив расположен в междуречье рек Эрзин и Нарын (рис. 1, А). В составе мас-

сива выделяют две фазы: 1) гиперстеновые и двупироксеновые габбро-диориты, монцодиориты, диориты и кварцевые диориты; 2) граносиениты и граниты. Габброиды слагают вытянутое тело 4×2 км и находятся в юго-восточном обрамлении гранитов. В монцодиоритах встречаются округлые

**Рис. 1.** Положение Нижнеэрзинского гранитного массива (А–Б) и минглинг-даек (Б–В) в образованиях Западного Сангилена (Юго-Восточная Тува) (А).

А – геологическая схема Западного Сангилена (Юго-Восточная Тува) (по [Karmysheva et al., 2017] с изменениями). 1 – образования Таннуольской островной дуги; *метаморфические комплексы* (2–4): 2 – мугурский, 3 – нижнеэрзинский, 4 – эрзинский; 5 – карбонатно-терригенный чехол (сангиленская серия); *магматические комплексы и серии* (6–9): 6 – актовракский дунит-гарцбургитовый комплекс, 7 – правотарлашкинский анортозит-габброноритовый комплекс, 8 – баянкольский габбро-монцодиорит-граносиенит (гранодиорит)-гранит-лейкогранитный комплекс, 9 – башкымугурский габбро-монцодиорит-гранит-лейкогранитный комплекс; 10 – бластомилониты *тектонических зон*: er – Эрзинская, ko – Кокмолгаргинская; 11 – Агардагский сутурный шов; 12 – границы тектонических покровов; 13 – разломы; 14 – *тектонические блоки* (1–3): 1 – Тарлашкинский, 2 – Мугуро-Чинчилигский, 3 – Эрзин-Нарынский; 15 – *гранитоидные массивы* (I–III): I – Матутский гнейсогранитный массив, II – Баянкольский габбро-монцодиорит-гранодиорит-гранитный массив, III – Нижнеулорский гранитный массив. Б – линейные характеристики Нижнеэрзинского гранитного массива и положение минглинг-образований на участке «Стрелка». В – скальное обнажение минглинг-даек в гранитоидах Нижнеэрзинского массива.

**Fig. 1.** Locations of the Nizhneerzin granite massif (A–B) and mingling dykes (B–V) in the Western Sangilen, Southeast Tuva (A).

A – schematic geological map of the Western Sangilen (SE Tuva) (after [Karmysheva et al., 2017], modified). 1 – formations of the Tannuola island arc; *metamorphic complexes* (2–4): 2 – Mugur, 3 – Nizhny Erzin, 4 – Erzin; 5 – carbonate-terrigenous cover (Sangilen series); *magmatic complexes and series* (6–9): 6 – Aktovrak dunite-harzburgite complex, 7 – Pravay Tarlashka anorthosite-gabbronorit complex, 8 – Bayankol gabbro-monzodiorite-granosyenite (granodiorite)-granite-leucogranite complex, 9 – Bashkymugur gabbro-monzodiorite-granite-leucogranite complex; 10 – blastomylonites of *tectonic zones*: er – Erzin, ko – Kokmolgarga; 11 – Agardag suture; 12 – boundaries of tectonic covers; 13 – faults; 14 – *tectonic blocks* (1–3): (1) Tarlashka, (2) Mugur-Chinchilig, (3) Erzin-Naryn; 15 – *granitoid massifs* (I–III): I – Matut gneiso-granite massif, II – Bayankol gabbro-monzodiorite-granodiorite-granite massif, III – Nizhny Ulor granite massif. B – linear characteristics of the Nizhny Erzin granite massif and the locations of mingling structures on the *Strelka* site. V – rocky outcrops of mingling dykes in granitoids of the Nizhny Erzin massif.

ксенолиты мелкозернистых габброидов, их количество достигает 30 % от общего объема. Для ксенолитов характерна порфиroidная структура, в которой вкрапленники сложены зональным плагиоклазом, а основная масса имеет микрогаббровую структуру, состоящую из ксеноморфных зерен плагиоклаза, моноклинного и ромбического пироксена [Shelepaev, 2006].

Гранитоиды Нижнеэрзинского массива образуют протяженное в плане тело, вытянутое с юго-запада на северо-восток (рис. 1, А, Б). По составу это порфиroidные граносиениты (кварц – 15–20 об. %, K-Na полевой шпат – 30–45 об. %, плагиоклаз – 10–15 об. %, биотит – 3–5 об. %, амфибол – 5–10 %) и лейкограниты (кварц – 40–45 %, калиевый полевой шпат – 30–35 %, плагиоклаз – 10–20 %, биотит – 1–3 %, ± роговая обманка). Для пород кислого состава характерна порфиroidная структура, в которой вкрапленники представлены крупными (до 2 см) агрегатами калиевого полевого шпата. Следует отметить, что подавляющий объем гранитоидов имеет признаки течения и директивных структур, что косвенно указывает на их синкинематический генезис. В краевой части массива директивность исчезает либо проявлена слабо.

Возраст граносиенитов и лейкогранитов Нижнеэрзинского массива U-Pb методом по цирконам определяется как  $491.6 \pm 9.5$  млн лет и  $489 \pm 2.6$  млн лет [Kozakov et al., 1999] соответственно. Изотопные определения возраста гранитоидов Rb-Sr

методом дают близкие оценки –  $486 \pm 10$  млн лет [Petrova, 2001].

Комплекс минглинг-даек, прорывающий породы Нижнеэрзинского массива, слагают линейно вытянутые тела. В качестве реперной выбрана комбинированная дайка на участке «Стрелка» (рис. 1). При мощности около 50 м она протягивается на несколько сотен метров. Контакты с вмещающими породами неявные и постепенные. Базиты преобладают в центральной части даек, слагают округлые, кляксообразные, с элементами вязкого будинирования тела. Контакты с кислой частью даек – пламенеvidные, фестончатые, часто встречается наличие переходных зон, которые, однако, резко отличаются по составу и зернистости как от калиево-щелочной, так и от мафической части даек [Karmysheva et al., 2015].

Состав базитов комбинированных даек варьируется от диоритов и амфиболовых габбро (биотит – 25–30 об. %, амфибол – 10–15 об. %, плагиоклаз – 40–45 об. %, кварц – <15 %) до монцогаббро и амфиболовых монцогаббро (роговая обманка – 45–60 об. %, биотит – 5 об. %, калиевый полевой шпат – 20–35 об. %, плагиоклаз – 10–15 об. %, кварц – <5 об. %). Породы средне-, мелкозернистые с габбровой и порфиroidной структурой.

Кислая часть даек сложена средне-, крупнозернистыми граносиенитами и двуполевошпатовыми гранитами (калиевый полевой шпат – 35–65 об. %, плагиоклаз – 10–20 об. %, кварц – 20–35 об. %, био-

тит и амфибол – 3–5 об. %). Структура пород варьируется от равномерно-зернистой до гломеропорфировой. Порфиновые вкрапленники сложены крупными агрегатами калиевого полевого шпата, иногда кварца.

Петрохимический состав пород, слагающих минглинг-дайку, приведен в таблице.

### 3.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Размеры Нижнеэрзинского гранитоидного массива позволяют охарактеризовать магматическую камеру, в пределах которой происходило внедрение базитовых расплавов с формированием комбинированных даек.

В современном эрозионном срезе Нижнеэрзинский гранитоидный массив представляет собой вытянутое тело, размеры которого в плане составляют 1500×17000 м (рис. 1, Б). Исходя из геологической ситуации, внедрение гранитоидных расплавов и формирование магматической камеры происходили в нижнекоровых условиях на пике коллизионных событий. Иными словами, вертикальные размеры магматической камеры с калиево-салическими расплавами могли превышать 1000 м. В совокупности это позволяет в расчетах рассматривать двумерную модель магматической камеры, размеры которой дают возможность абстрагироваться от влияния ее вертикальных стенок.

Для построения согласованной флюидо-термоконвективной модели комбинированной дайки использовались зависимости теплофизических свойств и петрологических параметров магм указанного состава от температуры, давления и содержания H<sub>2</sub>O. Составы калиево-салических и базитовых компонентов даек и пород вмещающего гранитоидного массива приведены в таблице (подготовлены по материалам И.В. Кармышевой с соавторами [Karmysheva et al., 2015]). Для расчета альтернативной модели с существованием гибридных сиенитовых магм в таблицу включены также данные из публикации [Burmakina, Tsygankov, 2013].

При моделировании механизмов продвижения магмы важно было определить параметры магм, при которых подъем композитной базит/салической смеси становился возможным, несмотря на большую плотность базитов в сравнении с гранитоидными расплавами.

## 4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, различаются три основных типа проявления процессов минглинга: в лавовых потоках, в комбинированных дайках и в магматических

камерах [Sklyarov, Fedorovskii, 2006; и др.]. В работе рассматривается модель развития минглинга для случая магматической камеры, высота которой существенно превышает ее ширину. Модель разработана, чтобы выяснить особенности формирования базитовых включений разнообразной формы в гранитоидной вмещающей массе. В Нижнеэрзинском массиве встречаются разнообразные формы магматического минглинга с переходом от отдельных включений и полос включений базитов до основных даек. Полосы включений, так же как и дайки, представляют собой результат внедрения базитового расплава в кислый, при этом базитовый расплав фрагментируется, т.е. распадается на отдельные шары, овоиды, «подушки» и проч. (рис. 1). Подобные «полосы включений» наблюдаются, например, в Магаданском габбро-гранитном сложном плутоне, где происходило одновременное внедрение в одну и ту же камеру кислого и базитового расплавов [Ponomareva et al., 1994].

Моделирование проведено в двух вариантах с различной геометрией области расчетов и составом расплавов. В первом варианте (рис. 2, А) рассматривалась интрузивная камера с высотой/шириной 1050×700 м, во втором (рис. 2, Б) – камера с высотой/шириной 300×50 м.

Первая модель предназначена для уточнения контролирующих параметров инициализации конвективных движений и формирования минглинг-образований в интрузивной камере. По геометрическим параметрам она максимально приближена к участку «Стрелка» (см. рис. 1, 2, А). В основании модельной области, представляющей собой придонную часть магматической камеры, задан горизонтальный «питающий» слой базитовой магмы мощностью 50 и протяженностью 700 м (рис. 2, А).

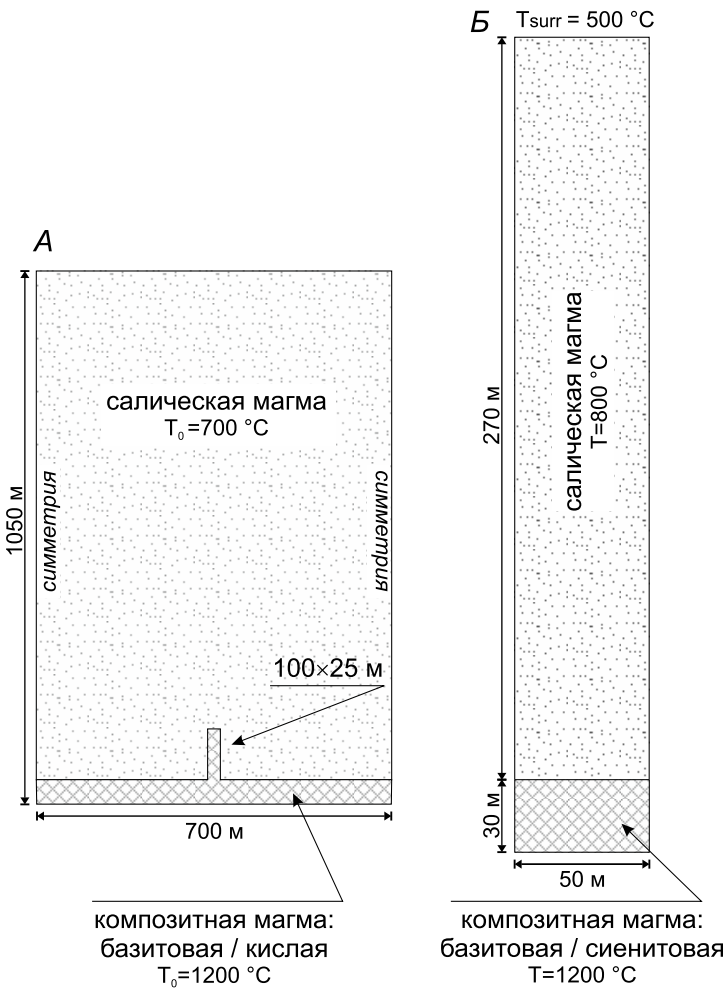
Предполагается, что на границе базитовой и калиево-салической магм в результате тектонической активности генерируется область локального возмущения, содержащая смесь расплавов. На рисунке 2, А, – это область 100×25 м в форме аппендикса. Для расчетов брались пропорции базитовый/салический расплав в отношениях 30/70, 50/50, 60/40, 70/30, 80/20 и 90/10 об. %. При выборе этих пропорций учитывались данные геохимического моделирования, основанного на масс-балансовых расчетах смешения по породообразующим и редким элементам. Примеры природных комбинированных интрузий дают следующие оценки параметров смешения: 75 % сиенитовой и 25 % трахибазальтовой магмы, по данным о составах магм Усть-Хилокского массива [Litvinovsky et al., 1995], доли 22.5–35.0 об. % базальтового компонента в гибридной магме комплекса Аустурхорн [Weidendorfer et al., 2014], доли 29.2 % базальта в гибридной

**Химический состав взаимодействующих расплавов (мас. %), принятый для расчета физических свойств, используемых при моделировании**  
**Chemical composition of interacting melts (wt. %) adopted to calculate the physical properties used in simulation**

Компонент	Баянкольская габбро-гранитная серия (Западные Сангилен)		Переходная порода (n=1)		Салическая часть даек (n=5) min – max average		Вмещающие граниты Нижнеэрзинского массива (n=3) min – max average		Бургасский кварц-сиенитовый массив (Западное Забайкалье)	
	Мафическая часть даек (n=3) min – max average	62.76	72.30 – 74.52 73.39	0.93	0.19 – 0.22 0.20	70.39 – 76.28 73.56	52.23	72.34	Кислые расплавы	Сиенитовый расплав
SiO <sub>2</sub>	<u>51.25 – 52.91</u> 52.13									
TiO <sub>2</sub>	<u>0.79 – 1.23</u> 1.05				<u>0.15 – 0.63</u> 0.38	1.54		0.29		0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>15.91 – 16.36</u> 16.21	14.43	<u>13.21 – 14.01</u> 13.54		<u>11.80 – 14.56</u> 13.20	18.18		14.78		16.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> */FeO	<u>7.69 – 9.82</u> 8.66	7.35	<u>1.27 – 1.77</u> 1.50		<u>1.57 – 3.07</u> 2.50	8.56		1.86		3.6
MnO	<u>0.11 – 0.18</u> 0.14	0.06	<u>&lt;0.01 – 0.02</u> 0.02		<u>0.02 – 0.04</u> 0.03	0.14		0.03		0.09
MgO	<u>5.09 – 6.24</u> 5.66	2.26	<u>0.14 – 0.69</u> 0.37		<u>0.23 – 1.11</u> 0.68	4.2		0.44		1.19
CaO	<u>7.59 – 9.44</u> 8.30	3.24	<u>1.14 – 1.49</u> 1.27		<u>1.43 – 2.09</u> 1.86	6.64		1.58		2.96
Na <sub>2</sub> O	<u>3.37 – 3.69</u> 3.48	3.55	<u>2.23 – 3.64</u> 3.03		<u>2.90 – 3.47</u> 3.24	4.76		4.01		4.63
K <sub>2</sub> O	<u>1.53 – 2.15</u> 1.81	3.40	<u>4.49 – 6.65</u> 5.48		<u>1.21 – 5.06</u> 3.63	2.66		4.57		4.54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<u>0.17 – 0.49</u> 0.33	0.32	<u>0.04 – 0.07</u> 0.05		<u>0.04 – 0.08</u> 0.06	0.71		0.09		0.18

Примечание. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – суммарное железо в форме Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для пород баянкольской серии Западного Сангилен, FeO – значения для пород Бургасского массива Западного Забайкалья. Анализ содержания петрогенных элементов для пород Западного Сангилен выполнен методом «мокрой» химии (аналитик – Н.Н. Ухова, ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЭК СО РАН, г. Иркутск) и методом РФА на установке СРМ-25 (аналитик – А.Д. Киреев, ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск). Анализы пород Западного Забайкалья приведены по материалам [Burmakina, Tsygankov, 2013].

Note. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – total iron in the form of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for the rocks of the Bayankol series (Western Sangilen), FeO – value for the rocks of the Burgass massif (Western Transbaikalia). Concentrations of petrogenic elements in the Western Sangilen rocks were analysed by the 'wet' chemistry method (analyst N.N. Ukhova, Geodynamics and Geochronology Center, Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk) and X-ray diffraction method using CPM-25 (analyst A.D. Kireev, Sobolev IGM SB RAS, Novosibirsk). The results of analysis of the rocks sampled from the Western Transbaikalia after [Burmakina, Tsygankov, 2013].



**Рис. 2.** Постановка задач моделирования магматического минглинга в камере и дайке: геометрия, граничные и начальные условия.

*А* – модель формирования комбинированной дайки в пределах участка «Стрелка» (Нижнеэрзинский гранитный массив (см. рис. 1, *Б, В*)). На границе вмещающей салической и композитной магмы предполагается локальная начальная неоднородность в виде выступа, обусловленная тектоническими факторами. *Б* – модель магматического минглинга, предполагающая внедрение смеси базитовой и сиенитовой магмы в основании камеры, заполненной салической магмой (по данным [Burmakina, Tsygankov, 2013]).

**Fig. 2.** Simulation of magma mingling in a chamber and a dyke. Statement of the problem: geometry, boundary and initial conditions.

*A* – model showing the formation of a combined dyke on the *Strelka* site (Nizhe Erzin granite massif (see Fig. 1, *Б, В*)); this model assumes that at the boundary between the host salic magma and composite magma, there is a local initial inhomogeneity in the form of a protrusion due to impacts of tectonic factors. *Б* – magma mingling model; this model assumes that the mixture of mafic and syenite magmas are intruded into the base of the chamber filled with salic magma (after [Burmakina, Tsygankov, 2013]).

магме Бургасского массива [Burmakina, Tsygankov, 2013].

Содержание петрогенных компонентов в расплавах соответствует составам магм, отвечающим комбинированным дайкам и гранитоидам Нижнеэрзинского массива (таблица).

Во второй модели рассматривается альтернативный случай, когда при взаимодействии кислых и базитовых магм генерируется область с производными сиенитовыми расплавами (рис. 2, *Б*). Состав и характеристики соответствующих расплавов рассчитаны по материалам [Burmakina, Tsygankov, 2013] (таблица). Поскольку объем гибридных сиенитовых магм предполагается незначительным, геометрия области для расчетов имеет меньшие размеры – 300×50 м и отвечает процессам минглинга внутри самой дайки. Питающим горизонтом в данном случае является, соответственно, не базитовый, а гибридный расплав – базит/сиенит (рис. 2, *Б*).

**Температурные граничные и начальные условия.** Предполагалось, что начальная температура в горизонтальном слое композитного расплава составляет 1200 °С. Начальная температура вы-

шеležащей гранитной магмы задавалась 700 °С. Давление принято 6–7 кбар, что соответствует условиям низов коры (20–25 км). На боковых границах заданы условия симметрии либо жесткой стенки. Модель не учитывает процесс вскипания летучих компонентов в расплаве – при расчете вязкости газовая фаза отсутствует.

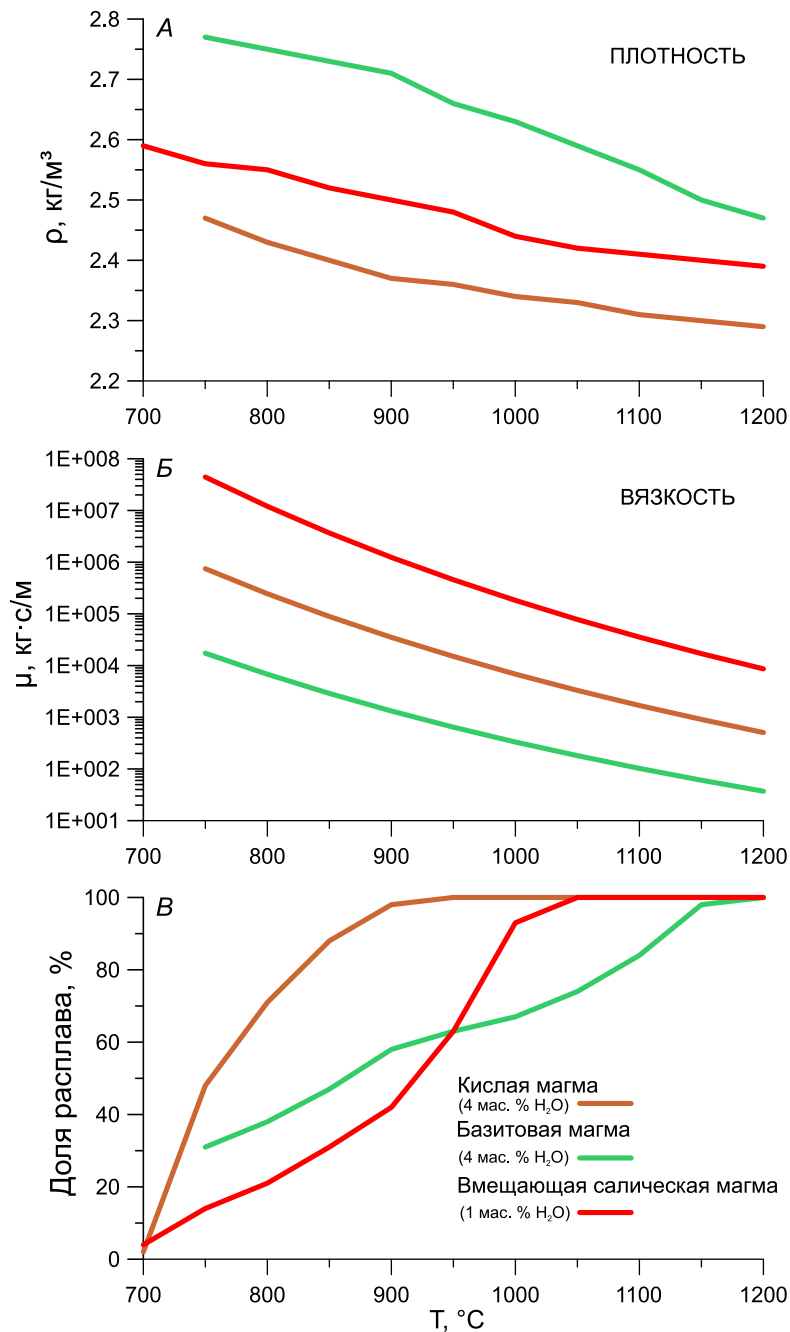
**Термореологические и петрологические параметры магм.** Вязкость магм рассчитывалась по экспериментальным зависимостям с учетом их валового химического состава, температуры, содержания воды в расплаве и степени кристаллизации согласно [Persikov, Bukhtiyarov, 2009]:

$$\eta_T^P = \eta_0 \exp\left(\frac{E_X^P}{RT}\right),$$

$$\eta_{эф} = \eta_T^P (1 - V_{кр})^{-3.35} (1 - 1.5V_{фл})^{-0.55}, \quad (1)$$

где  $\eta_0$  – предэкспоненциальная константа, характеризующая вязкость расплава при  $T \rightarrow \infty$ ,  $\eta_0 = 10^{-3.5 \pm 10^{0.1}}$  (0.1 Па·с);  $T$  – абсолютная температура (К);  $E_X^P$  – энергия активации вязкого течения, которая является функцией давления и состава рас-





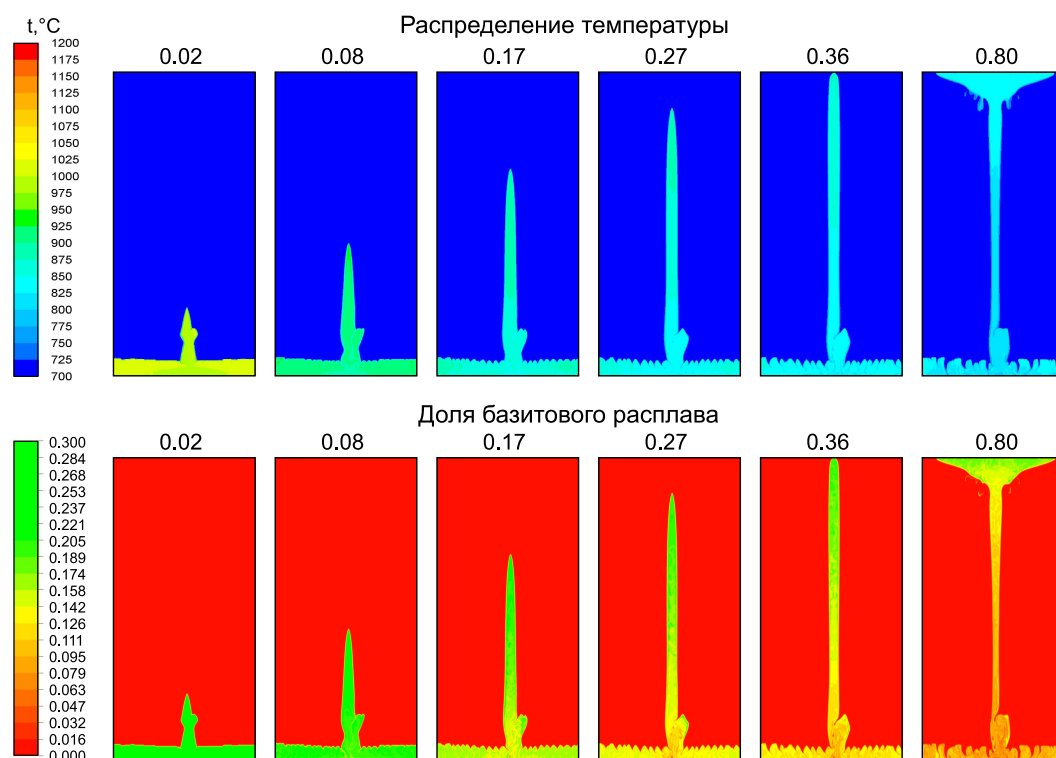
**Рис. 3.** Физические свойства салических и базитовых расплавов, принятые в моделях: плотность (А), вязкость (Б) и степень плавления (В). Параметры рассчитаны с использованием программы MELTS [Ghiorso, Sack, 1995]. Содержание воды в базитовом и кислом расплаве композитной магмы 4 мас. %, во вмещающей салической магме – 1 %.

**Fig. 3.** Physical properties of salic and mafic melts in the models: density (A), viscosity (B), and degree of melting (B). The parameters were calculated by MELTS software [Ghiorso, Sack, 1995]. The water content is 4 wt. % in the mafic and acid melt of the composite magma, and 1wt. % in the enclosing salic magma.

плава, включая летучие компоненты;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\eta_T^P$  – вязкость расплава при данной температуре и давлении ( $0.1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 1 \text{ пуаз}$ );  $0 \leq V_{\text{кр.}} \leq 0.45$ ,  $0 \leq V_{\text{фл.}} \leq 0.45$  – объемная доля кристаллов и пузырей флюидной фазы, соответственно. На рисунке 3, Б, показана рассчитанная по соотношениям (1) зависимость вязкости от температуры для трех типов магм, составы которых приведены в таблице, при указанном ниже содержании растворенной в расплаве воды. Из температурных зависимостей следует, что вязкость каждого типа магмы меняется от ликвидуса до солидуса на 2.5–3.5 порядка, а для разных типов магм вязкость варьируется в пределах 2–3 порядков при одинаковой температуре (рис. 3).

Плотность, степень кристаллизации, а также температуры солидуса и ликвидуса рассчитаны для базитовых, кислых даек и вмещающих пород массива с использованием программы MELTS [Ghiorso, Sack, 1995; Asimow, Ghiorso, 1998]. Плотность, вязкость и степень кристаллизации салической и базитовой магм в расчетах соответствуют содержанию воды в расплаве 4 мас. %, а параметры вмещающей кислой магмы приняты с учетом содержания летучих 1 мас. %. Зависимости физических свойств от температуры показаны на рисунке 3.

Диффузия основных компонентов между фазами в модели не рассматривается, так как скорость молекулярной диффузии в  $10^4$  раз ниже скорости



**Рис. 4.** Результаты моделирования магматического минглинга (распределение температуры и доли базитового компонента в камере). Вариант А (см. рис. 2, А) – существование начального локального возмущения тектонической природы с соотношением базитового/кислого компонента 30/70 %. Цифры над рисунками (0.02, 0.08, ..., 0.80) означают длительность процесса подъема расплавов в годах.

**Fig. 4.** Magma mingling. Simulation results (patterns of temperature and the ratio of mafic component in the chamber). Variant A (see Fig. 2 A) – presence of the local initial inhomogeneity caused by tectonic factors; the ratio of mafic/acid components is 30/70 %. Numbers (0.02, 0.08, ..., 0.80) above the figures – duration of melting (years).

конвекции жидкости [Gutierrez, Parada, 2010]. Это означает, что на фоне переноса вещества потоком жидкости при конвекции перенос компонентов между фазами за счет диффузии оказывается ничтожно малым и поэтому не учитывается.

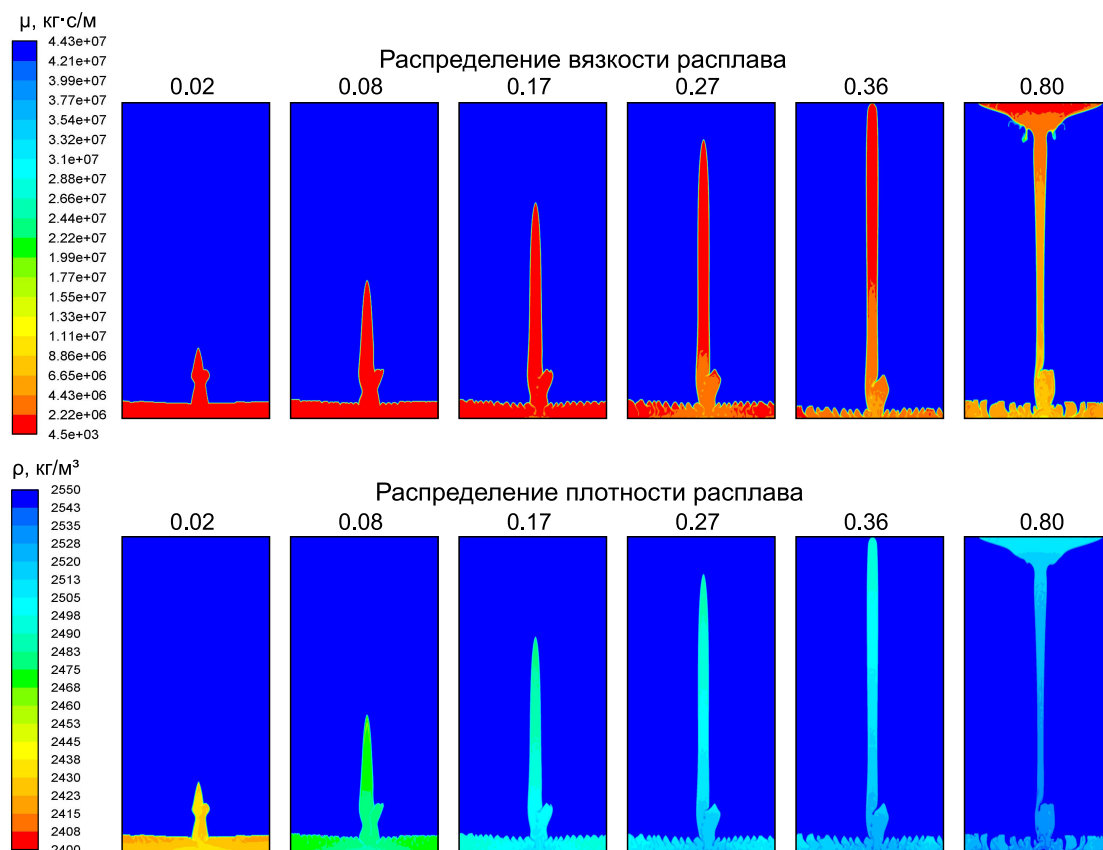
**Численный метод.** В настоящей работе решается система уравнений Навье-Стокса в приближении сжимаемой жидкости: уравнение неразрывности, уравнение движения и уравнение сохранения энергии. Для решения задачи использовался вычислительный пакет ANSYS Fluent [ANSYS Fluent Theory Guide, 2009], в котором реализованы численные методы и алгоритмы для решения задач, связанных с течением жидкости. Модель учитывает влияние дополнительных факторов, таких как нагрев за счет внутренних источников тепла, диффузионный массоперенос, изменения фазового состояния (плавление-кристаллизация, кипение), химические реакции. Для модели дайки применялась сетка 1050×700 ячеек. Результаты моделирования представляются в виде нестационарных двумерных полей температуры, вязкости, плотности магмы, а также распределения фаз (базитовой и салической – в дайке и вмещающей среде).

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 5.1. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ДАЙКИ (ВАРИАНТ А)

На рисунках 4 и 5 приведены результаты моделирования развития дайки комбинированного состава при начальном соотношении базитового/кислого расплава 30/70 % в камере. Вмещающая среда гранитного состава, как предполагалось, была частично расплавлена и имела начальную температуру выше солидуса ( $T=700$  °C,  $X_{H_2O}=1$  мас. %), при небольшом содержании расплава (см. рис. 3, В, первые проценты). В этом состоянии вмещающая гранитная магма ведет себя как вязкопластичная среда [Rosenberg, Handy, 2005], способная к разрыву жесткого каркаса под воздействием инъекции легкого расплава.

Как следует из численных экспериментов, подъем водонасыщенной, легкой, маловязкой магмы происходит в форме почти вертикальной дайки (рис. 4, 5). В этом варианте модели из «зародышевой» трещины развивается коническая дайка, в начальный момент времени она способна к вет-



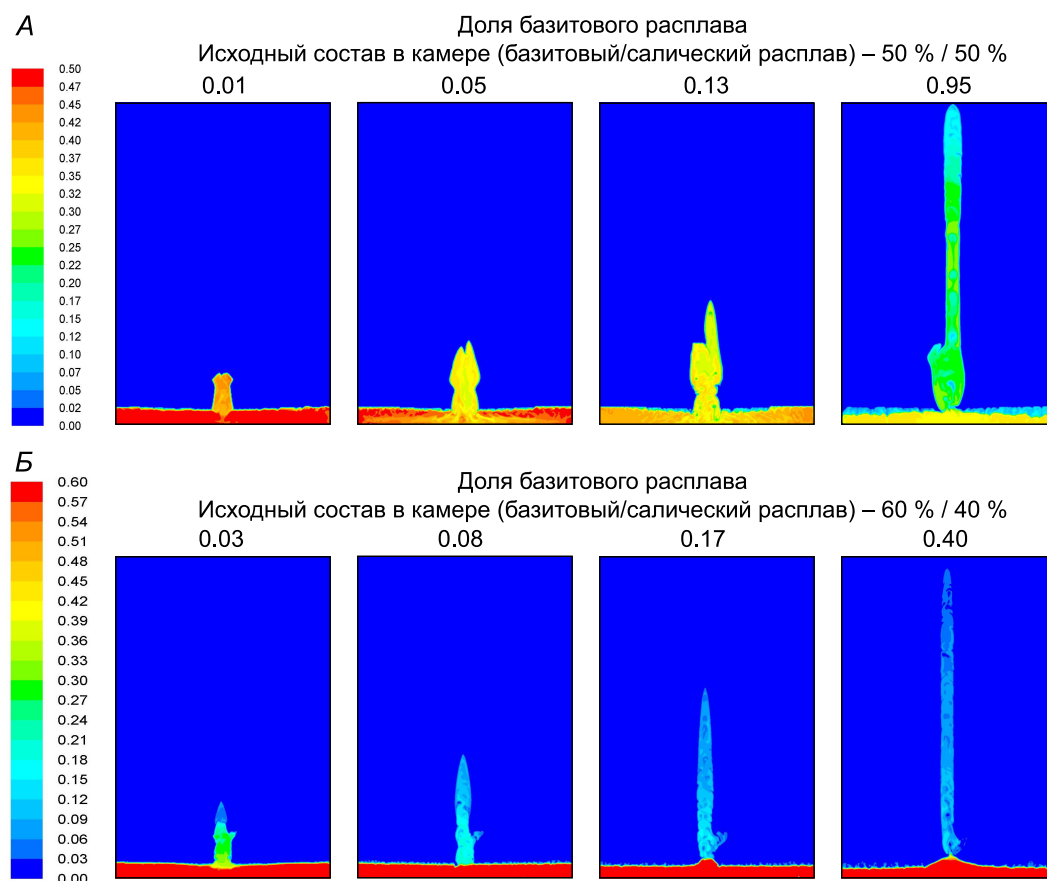
**Рис. 5.** Результаты моделирования магматического минглинга (распределение вязкости и плотности расплавов в камере). Вариант А (см. рис. 2, А) – существование начального возмущения тектонической природы с соотношением базитового/кислого компонента 30/70 %. Цифры над рисунками (0.02, 0.08, ..., 0.80) означают длительность процесса подъема расплавов (в годах).

**Fig. 5.** Magma mingling. Simulation results (patterns of viscosity and density of melts the chamber). Variant A (see Fig. 2 A) – presence of the initial inhomogeneity caused by tectonic factors; the ratio of mafic/acid components is 30/70 %. Numbers (0.02, 0.08, ..., 0.80) above the figures – duration of melting (years).

влению (момент 0.02 года), но затем одна из ветвей становится преобладающей и формируется локализованный подъемный канал (дайка) всплывающей легкой магмы (рис. 4, 0.02–0.80 года). Мощность дайки слабо изменяется по протяженности и составляет 50–60 м, принимая пикообразную форму при подъеме. Как следует из экспериментов, дайка способна продвигаться с высокой скоростью и продвигается на 1000 м за 0.36 года ( $V=2.7$  км/год). Когда магма достигает жесткой верхней поверхности, она растекается горизонтально, принимая форму силла. На рисунке 5 приведены распределения вязкости и плотности в дайке и вмещающей среде. Из моделирования следует, что контраст плотности и вязкости всплывающего и вмещающего расплавов со временем уменьшается.

Были выполнены расчеты для определения критической доли кислого материала в смеси, способного транспортировать вверх более плотные бази-

товые массы. Для этого проводились численные эксперименты с разными соотношениями базитового/салического компонента в исходном расплаве: 30/70, 50/50, 60/40, 70/30, 80/20 и 90/10 об. %. Как и предполагалось, со снижением доли салического вещества подъем базитов становится менее эффективным (рис. 6). Для первых трех соотношений, когда доля салического компонента составляет не менее 40 %, высота подъема базитовой фазы ограничена только высотой модельной области (1 км), т.е. перенос осуществляется до верхней границы (см. рис. 4, 5). При других соотношениях (рис. 6) подъем происходит медленнее (50/50 %) либо на меньшую высоту (60/40 %). При меньшем содержании салического компонента гравитационной подъемной силы недостаточно, чтобы поднять более тяжелый базитовый расплав – последний успевает осесть на дно горизонтальной камеры. Обнаружен предел содержания салического компонента в источниковой камере, при



**Рис. 6.** Сравнение результатов моделирования магматического минглинга в камере (вариант А, начальное синтетическое возмущение, см. рис. 2, А) с различным соотношением базитового/салического компонента (А: 50/50 %; Б: 60/40 %). Цифры над рисунками означают длительность процесса смешения в годах.

**Fig. 6.** Comparison of the magma mingling simulation results (chamber) (Variant A, the local initial inhomogeneity caused by tectonic factors, see Fig. 2, A) for different ratios of mafic/salic components (A: 50/50 %; B: 60/40 %). Numbers above the figures – duration of melting (years).

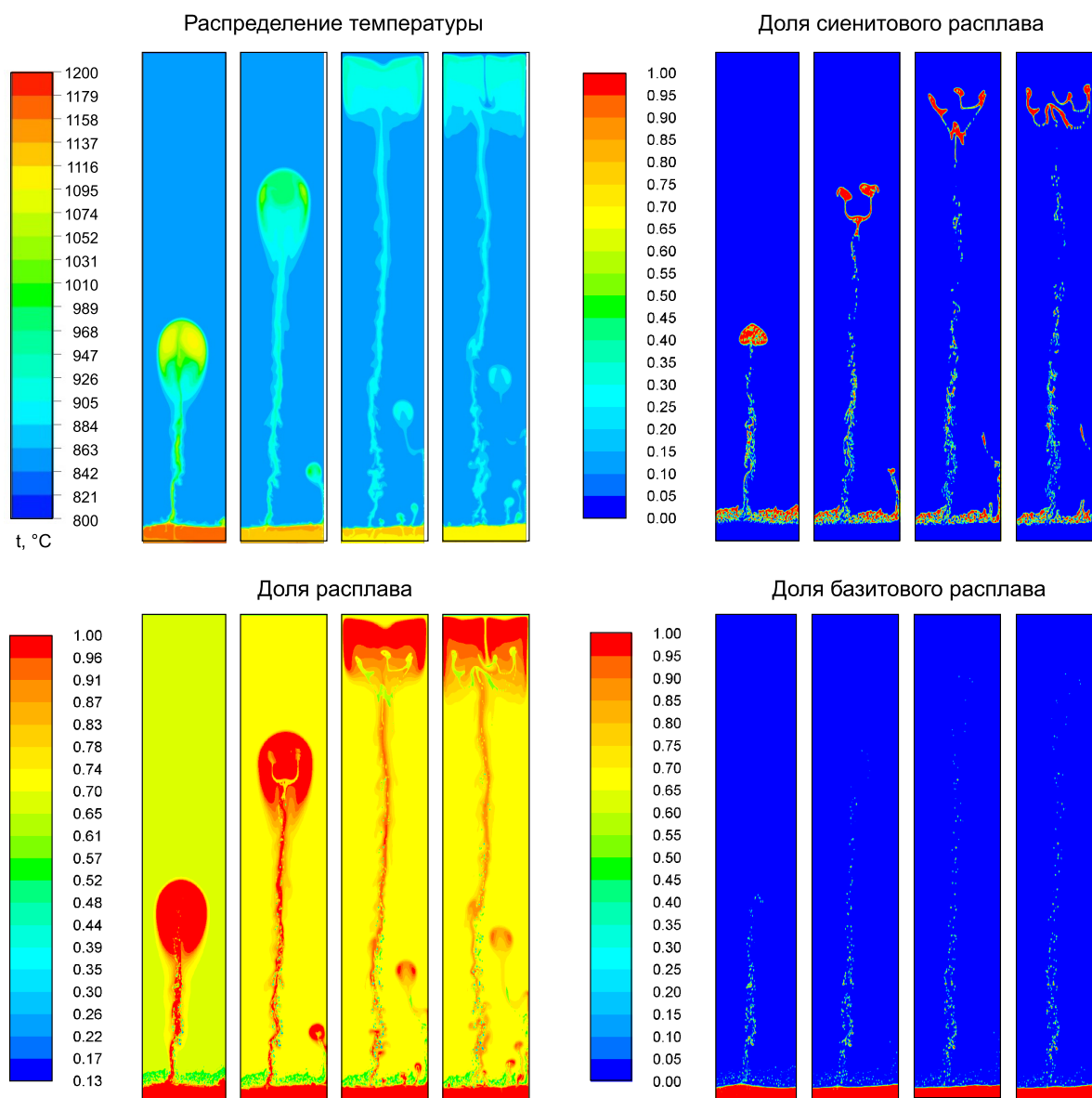
котором все базиты всплывают в массе кислого материала: эта величина составляет не менее 40 %.

Вариант модели с пропорцией базитовый/кислый расплав 60/40 % рассмотрим более подробно. Как следует из рисунка 6, Б, придонный слой камеры не истощается в отношении базитового компонента. Это говорит о том, что данное соотношение расплавов, по-видимому, предельное, при котором базитовая фаза способна подниматься. В процессе подъема участвует в основном вещество, находящееся в начальной трещине, и небольшая доля из придонной части камеры. Далее исходный основной расплав остывает, частично кристаллизуется, и его плотность становится выше, чем плотность вмещающего вещества кислого состава, базитовая фаза прекращает поступать в канал из придонной области. В итоге поднимается только то вещество, которое находилось в «зародышевой» трещине. При этом процесс протекает быстрее, так как количество вещества, которое отрывается, достаточно мало, в то же время его температура довольно вы-

сока и это создает большой контраст плотности с вмещающим веществом, что и объясняет высокую скорость процесса.

## 5.2. МОДЕЛЬ МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА В ДАЙКЕ (ВАРИАНТ Б)

В отличие от предыдущего, в варианте Б рассматривалась задача взаимодействия трех фаз, постановка задачи показана на рис. 2, Б. для вмещающей среды задавался гранитный состав, а в источнике предполагалась смесь базитового и среднего (сиенитового) расплавов в соотношении 70/30 %. Содержания расплавов, принятые для расчета теплофизических свойств, которые используются в модели, приведены в таблице. По расчетам свойств расплавов с помощью программы MELTS [Ghiorso, Sack, 1995; Asimow, Ghiorso, 1998] сиенитовый расплав с содержанием воды 2.5 % оказывается легче кислого с содержанием воды 1 % при одинаковой температуре 900 °C – 2360 и



**Рис. 7.** Результаты моделирования магматического минглинга: распределение температуры, степени плавления и содержания фаз разного состава (в долях). Вариант *Б* (см. рис. 2, *Б*) – модель магматического минглинга по данным [Burmakina, Tsygankov, 2013]. Цифры над рисунками (0.3, 0.6, ..., 2.2) означают длительность процесса подъема магмы в годах.

**Fig. 7.** Magma mingling simulation results: patterns of temperature, degree of melting and phases of different compositions (in ratios). Variant *Б* (see Fig. 2, *Б*) – magmatic mingling model based on the data from [Burmakina, Tsygankov, 2013]. Numbers (0.3, 0.6, ..., 2.2) above the figures – duration of magma uplifting (years).

2370 кг/м<sup>3</sup>, соответственно. Эта разница плотностей оказывается достаточной, чтобы началась гравитационная дифференциация.

В этом варианте модели формируется локализованный подъемный поток всплывающего легко-го сиенитового расплава (рис. 7). Динамика подъема показана в анимационном файле [phase3-syenite.mpeg](#) (см. Дополнительные материалы on-line). Поднимающаяся смесь сиенитового и базитового компонентов представляет собой «диапир», который соединен с придонной зоной камеры уз-

ким каналом (рис. 7). По каналу постоянно идет поток смеси сиенитовой фазы с включениями базитов. Во время всплывания базитовые включения концентрируются по периферии потока, постепенно остывают, образуя тем самым жесткие стенки канала, внутри которых продолжает подниматься жидкая фракция. Диапир по мере подъема теряет устойчивость и распадается на несколько тел.

Динамика подъема базитов в потоке более кислой магмы приведена в анимационной форме (см. файлы в Дополнительных материалах on-line:

[phase2-basic.mpeg](#) и [phase2zoom-basic.mpeg](#) – увеличенный фрагмент в средней части дайки).

Максимальная концентрация базитовой фазы устанавливается в нижней части канала. Чем выше поднимается смесь, тем меньше концентрация и размеры вкраплений. Базитовый компонент захватывается сиенитовой фазой и поднимается вплоть до уровней камеры, где температура окружающей салической магмы достаточно высока (вязкость не превышает  $10^8$  Па с) и магма остается мобильной. Это значение вязкости соответствует реологическому порогу, при превышении которого течение расплава практически прекращается. В области повышенной вязкости, в прикровельной части камеры, базитовые включения практически отсутствуют (рис. 7). На поздних стадиях может сформироваться несколько вторичных диапиров в нижней части камеры, которые появляются вследствие подъема реститового вещества из истощенного нижнего слоя камеры. Ввиду небольшой доли легкого материала, эти диапиры уже практически не в состоянии вовлечь в движение и поднимать базитовые включения. Они поднимаются на некоторую высоту и застывают.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Разработанная модель позволяет описать гидродинамику формирования минглинг-структур в пределах интрузий сложного состава. Показаны возможные сценарии развития многофазных систем с образованием либо каналов подъема смеси в форме даек, либо рассеянного минглинга. Петрологические, термодинамические и термомеханические аспекты взаимодействия магм достаточно сложны, поэтому мы ограничились на первом этапе моделью динамики жидкости, не рассматривая изменение химического и минерального состава магм при фракционной кристаллизации. Тем не менее выполненное моделирование позволило предложить возможные сценарии конвективного теплопереноса и транспорта вещества при взаимодействии контрастных по свойствам и параметрам кристаллизации магм.

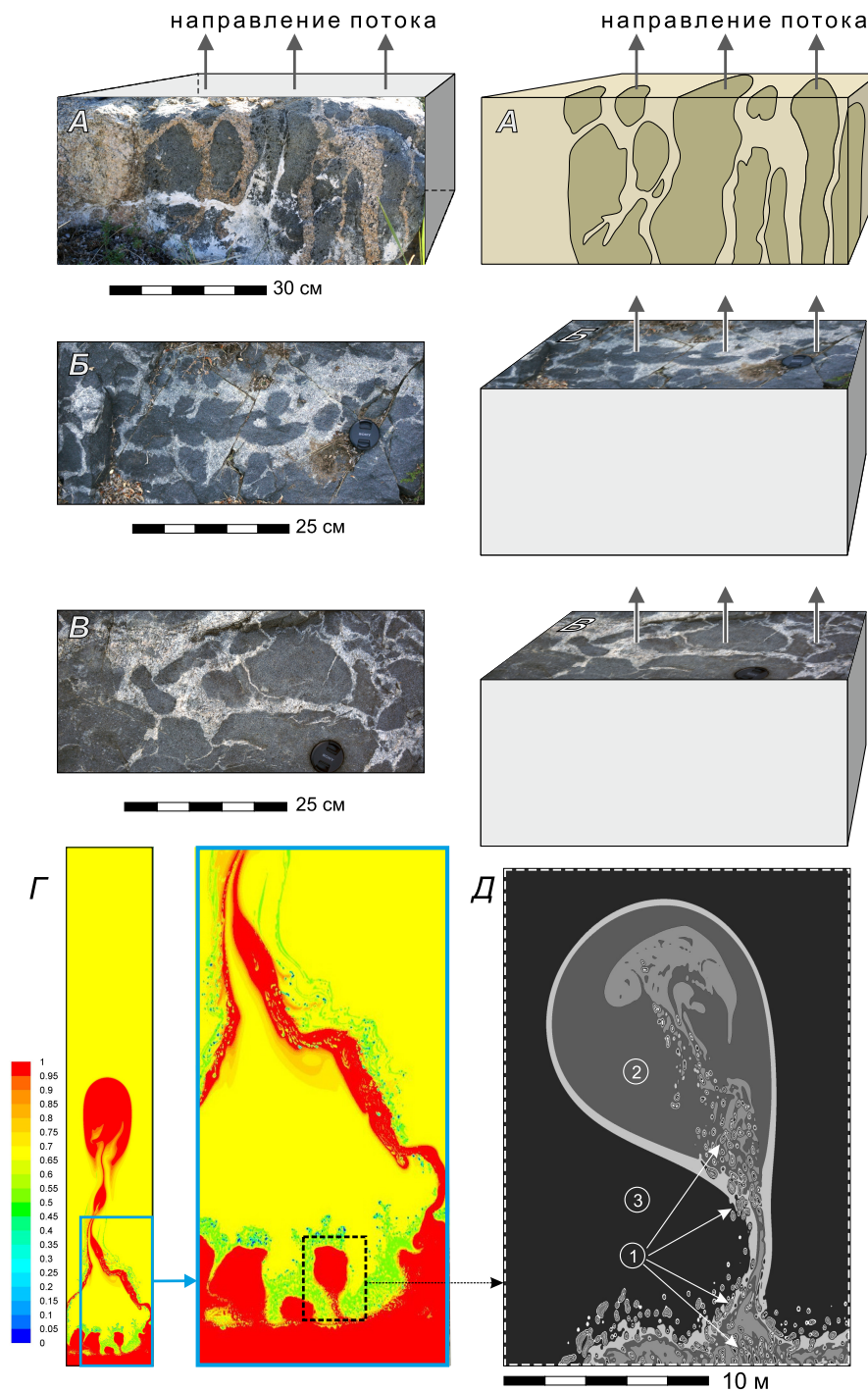
Модель отражает совместное действие нескольких процессов: конвективного течения ввиду гравитационной дифференциации, формирования роев базитовых нодулей (минглинг), влияния кристаллизации на реологические параметры и, следовательно, на течение магм с контрастными свойствами.

В модели без взаимопроникновения фаз получены реалистичные картины жидкостной несмешиваемости базитового и кислого (либо сиенитового)

расплавов. Смоделирован механизм, по которому происходит обособление базитового расплава в форме цепочек или роя включений при движении магмы. В качестве иллюстрации на рисунке 8 приведено сравнение модельных результатов и примера магматического минглинга в структуре комбинированной интрузии (Нижнеэрзинский гранитный массив, участок «Стрелка») по данным [Vladimirov et al., 2016]. На рисунке 8, А–В, четко выделяются нодули базитового вещества, включенные в салическую матрицу, при этом доля базитового компонента локально (в масштабе фотографии) может достигать 50–70 %. Из результатов моделирования следует, что средний размер базитовых включений составляет 20–30 см, а минимальный размер нодул при разрешении вычислительной сетки  $10 \times 10$  и  $5 \times 5$  см ограничен размером ячейки, т.е. детальностью модели.

В результате моделирования установлено, что основным критерием режима конвекции магм является, в первую очередь, соотношение плотности, а не вязкости взаимодействующих расплавов. Чем меньше разность плотностей, тем меньше размеры неоднородностей, которые образуются при взаимодействии расплавов. Когда же разность плотности достаточно велика, происходит формирование восходящих потоков (струй) или диапиров с захватом и подъемом тяжелой фазы (рис. 8, А–Г). Стоит также заметить, что вязкость не является определяющим фактором, контролирующим процессы гибридации или минглинга, но может влиять на длительность процесса и форму всплывающего вещества. Следует пояснить, что мы имеем в виду. Физико-химические различия процессов гибридации и минглинга, согласно определению, состоят в следующем. Гибридация может происходить «на месте» за счет диффузии, т.е. без какого-либо перемещения магматического вещества одного состава относительно другого. При минглинге включения одного вещества всегда перемещены в массу другого и, как правило, «оторваны» от источника расплава. Конвективные движения расплавов осуществляются только при наличии движущей силы, а именно подъемной силы, ввиду различия в плотности. Таким образом, при общей низкой величине вязкостей движение расплавов возможно только тогда, когда разность плотностей двух сред достаточна для начала конвекции, а разность вязкостей будет определять форму контакта сред (извилистый и размытый или гладкий и резкий). В процессе охлаждения, когда основной расплав, а затем кислый, кристаллизуясь, затвердевают, движение прекращается ввиду многократного увеличения вязкости.

Наблюдения и проведенное моделирование показывают, что контакты контрастных пород имеют пламеподобную или фестончатую форму. На кон-



**Рис. 8.** Сравнение наблюдаемых структур минглинга в обнажениях Нижнеэрзинского массива (А-В) и результатов численного моделирования (Г-Д).

Наблюдается соответствие природных и расчетных данных, указывающих на возможность механизма вертикальной инъекции комбинированных расплавов с формированием минглинг структур. А-В – обнажения Нижнеэрзинского массива с признаками магматического минглинга, формирующегося в процессе вертикальной инъекции комбинированного расплава. Г – результат высокоразрешающего моделирования распределения расплава в магматической камере. Д – фрагмент нижней области модели (Г) с применением детальной сетки, отражающей распределение фаз разного состава. Цифрами обозначены: 1 – базитовые нодулы в окружении салической магмы, 2 – канал течения сиенитового расплава, 3 – вмещающая салическая магма.

**Fig. 8.** Comparison of the observed mingling structures in the outcrops of the Nizhny Erzin massif (A-B) and the numerical simulation results (Г-Д).

The natural and calculated data, suggesting a possibility of vertical injection of combined melts and the formation of mingling structure, are correlated. A-B – outcrops of the Nizhny Erzin massif with the features of magma mingling that takes place during vertical injection of combined melt. Г – result of high-resolution modeling of the pattern of melt in the magma chamber. Д – fragment of the lower segment of the model (Г) using a detailed grid that reflects the distribution of the phases of different compositions. Numbers: 1 – mafic nodules surrounded by salic magma, 2 – channel of syenite melt flow, 3 – host salic magma.

такте, как правило, имеются зоны гибридизации шириной от нескольких до первых десятков сантиметров более меланократового состава, чем салическая область интрузий. Эти признаки, а также диффузный или сетчато-жильный характер переходных зон контрастных пород говорят о том, что магмы взаимодействовали в существенно жидком состоянии. По-видимому, процесс минглинга происходит, когда степень кристалличности не достигает реологического порога, выше которого магма приобретает жесткий каркас и не способна к течению в виде сплошной среды [Rosenberg, Handy, 2005].

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана численная термомеханическая модель процессов магматического минглинга, учитывающая многофазное взаимодействие разных по составу и свойствам расплавов. На основе моделирования предложен механизм подъема высокоплотных базитовых включений в камере или дайке, заполненной салической магмой, путем гравитационного всплывания менее плотных водонасыщенных расплавов во вмещающей гранитной магме, охлажденной и потерявшей летучие компоненты. Высокорастворяющая компьютерная модель предложенного механизма позволяет визуализи-

ровать процессы совместного течения расплавов в условиях жидкостной несмесимости, наблюдаемые в природе [Karmysheva et al., 2015; Weidendorfer et al., 2014; Dokukina et al., 2010; Hopson, Mattinson, 1994; Litvinovsky et al., 1995] и в экспериментах [Fischer et al., 2016; Veksler et al., 2007].

2. Выполненное моделирование показывает, что основным параметром, контролирующим форму и размер поднимающихся тел, является разность плотностей. В свою очередь, контрастность вязкости определяет, происходит ли взаимопроникновение и гибридизация магм. Существует предельное значение вязкости салической магмы ( $10^8$  Па с), при котором движение замедляется и конвективный перенос вещества прекращается.

3. В зависимости от параметров вязкости исходной магмы оценена длительность подъема расплавов и развития минглинг-структур в комбинированных дайках, которая составляет порядка года при характерной скорости 2–3 км/год.

## 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант №15-17-10010, РФФИ (гранты № 17-05-0848, 16-05-01011, 14-05-00747), а также Министерства образования и науки РФ (проект № 5.1688.2017/ПЧ).

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

ANSYS Fluent Theory Guide, 2009. Release 12.1.

Asimow P.D., Ghiorso M.S., 1998. Algorithmic modifications extending melts to calculate subsolidus phase relations. *American Mineralogist* 83 (9–10), 1127–1132. <https://doi.org/10.2138/am-1998-9-1022>.

Bohrson W.A., Spera F.J., Ghiorso M.S., Brown G.A., Creamer J.B., Mayfield A., 2014. Thermodynamic model for energy-constrained open-system evolution of crustal magma bodies undergoing simultaneous recharge, assimilation and crystallization: the magma chamber simulator. *Journal of Petrology* 55 (9), 1685–1717. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu036>.

Burmakina G.N., Tsygankov A.A., 2013. Mafic microgranular enclaves in Late Paleozoic granitoids in the Burgasy quartz syenite massif, western Transbaikalia: Composition and petrogenesis. *Petrology* 21 (3), 280–303. <https://doi.org/10.1134/S086959111303003X>.

Dokukina K.A., Konilov A.N., Kaulina T.V., Vladimirov V.G., 2010. Interaction between mafic and felsic magmas in subvolcanic environment (Tastau igneous complex, Eastern Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics* 51 (6), 625–643. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.05.004>.

Fischer L.A., Wang M., Charlier B., Namur O., Roberts R.J., Veksler I.V., Cawthorn R.G., Holtz F., 2016. Immiscible iron- and silica-rich liquids in the Upper zone of the Bushveld Complex. *Earth and Planetary Science Letters* 443, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.016>.

Ghiorso M.S., Sack R.O., 1995. Chemical mass-transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated-temperatures and pressures. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 119 (2–3), 197–212. <https://doi.org/10.1007/BF00307281>.

Gutierrez F., Parada M.A., 2010. Numerical modeling of time-dependent fluid dynamics and differentiation of a shallow basaltic magma chamber. *Journal of Petrology* 51 (3), 731–762. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp097>.

Hopson C.A., Mattinson J.M., 1994. Chelan migmatite complex: Field evidence for mafic magmatism, crustal anatexis, mixing and protodiapiric emplacement. In: D.A. Swanson, R.A. Haugerud (Eds.), *Geology field trips in the Pacific Northwest*. GSA Annual Meeting. University of Washington, Seattle, p. 2001–2021.

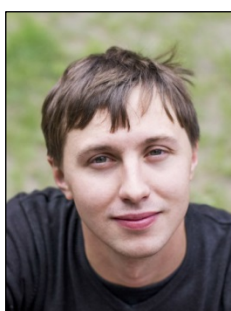


- Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., 2017. Synkinematic granitoid magmatism of Western Sangilen, South-East Tuva. *Petrology* 25 (1), 87–113. <https://doi.org/10.1134/S0869591117010040>.
- Karmysheva I.V., Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Shelepaev R.A., Yakovlev V.A., Vasyukova E.A., 2015. Tectonic position of mingling dykes in accretion-collision system of Early Caledonides of West Sangilen (South-East Tuva, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (3), 289–310. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0183>.
- Kozakov I.K., Sal'nikova E.B., Bibikova E.V., Kirnozova T.I., Kotov A.B., Kovach V.P., 1999. Polychronous evolution of the paleozoic granitoid magmatism in the Tuva-Mongolia massif: U-Pb geochronological data. *Petrology* 7 (6), 592–601.
- Litvinovsky B.A., Zanzvilevich A.N., Kalmanovich M.A., 1995. Multiple mixing of coexisting syenitic and basaltic magmas and its petrological implications, Ust'-Khilok massif, Transbaikalia. *Petrologiya (Petrology)* 3 (2), 133–157 (in Russian) [Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Калманович М.А. Многократное смешение сосуществующих сиенитовых и базитовых магм и его петрологическое значение, Усть-Хилокский массив, Забайкалье // *Петрология*. 1995. Т. 3. № 2. С. 133–157].
- 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. *Russian Geology and Geophysics* 50 (12), 1079–1090. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.11.007>.
- Petrelli M., Perugini D., Poli G., 2006. Time-scales of hybridisation of magmatic enclaves in regular and chaotic flow fields: petrologic and volcanologic implications. *Bulletin of Volcanology* 68 (3), 285–293. <https://doi.org/10.1007/s00445-005-0007-8>.
- Petrova A.Yu., 2001. Rb-Sr Isotope System of Metamorphic and Magmatic Rocks of the Western Sangilen (South-Eastern Tuva). Author's brief thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). IMGRE, Moscow, 26 p. (in Russian) [Петрова А.Ю. Rb-Sr изотопная система метаморфических и магматических пород Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИМГРЭ, 2001. 26 с.].
- Ponomareva A.P., Izokh E.P., Andreeva N.V., 1994. Interaction of mantle and crustal melts during the formation of the Magadan batholith. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 35 (2), 25–34 (in Russian) [Пonomарева А.П., Изох Э.П., Андреева Н.В. Взаимодействие мантийных и коровых расплавов при формировании Магаданского батолита // *Геология и геофизика*. 1994. Т. 35. № 2. С. 25–34].
- Rosenberg C.L., Handy M.R., 2005. Experimental deformation of partially melted granite revisited: implications for the continental crust. *Journal of Metamorphic Geology* 23 (1), 19–28. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2005.00555.x>.
- Semenov A.N., Polyansky O.P., 2017. Numerical modeling of the mechanisms of magma mingling and mixing on the example of the complex intrusions formation. *Russian Geology and Geophysics* 58 (11) (in press) (in Russian) [Семенов А.Н., Полянский О.П. Численное моделирование механизмов минглинга и миксинга магмы на примере формирования сложных интрузивов // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58. № 11 (в печати)].
- Shelepaev R.A., 2006. Evolution of Basic Magmatism, Western Sangilen (South-Eastern Tuva). Author's brief thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Novosibirsk, 16 p. (in Russian) [Шеленаев Р.А. Эволюция базитового магматизма Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2006. 16 с.].
- Simakin A.G., Bindeman I.N., 2012. Remelting in caldera and rift environments and the genesis of hot, "recycled" rhyolites. *Earth and Planetary Science Letters* 337–338, 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.011>.
- Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., 2006. Magma mingling: Tectonic and geodynamic implications. *Geotectonics* 40 (2), 120–134. <https://doi.org/10.1134/S001685210602004X>.
- Spera F.J., Schmidt J.S., Bohron W.A., Brown G.A., 2016. Dynamics and thermodynamics of magma mixing: Insights from a simple exploratory model. *American Mineralogist* 101 (3), 627–643. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5305>.
- Veksler I.V., Dorfman A.M., Borisov A.A., Wirth R., Dingwell D.B., 2007. Liquid immiscibility and evolution of basaltic magma. *Journal of Petrology* 48 (11), 2187–2210. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm056>.
- Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., 2016. Two groups of magmatic mingling (on the example of the Early Caledonides of Western Sangilen, South-Eastern Tuva). In: Correlation of the Altaides and Uralides: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics and metallogeny. Proceedings of the 3rd International scientific conference. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 52–53 (in Russian) [Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А. Две группы магматического минглинга (на примере ранних каледонид западного Сангилен, Юго-Восточная Тува) // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения: Материалы Третьей международной научной конференции. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. С. 52–53].
- Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Gibsher A.S., Travin A.V., Rudnev S.N., Shemelina I.V., Barabash N.V., Savinykh Ya.V., 2005. Model of the tectonometamorphic evolution for the Sangilen block (Southeastern Tuva, Central Asia) as a reflection of the Early Caledonian accretion-collision tectogenesis. *Doklady Earth Sciences* 405 (8), 1159–1165.
- Weidendorfer D., Mattsson H.B., Ulmer P., 2014. Dynamics of magma mixing in partially crystallized magma chambers: textural and petrological constraints from the basal complex of the Austurhorn intrusion (SE Iceland). *Journal of Petrology* 55 (9), 1865–1903. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu044>.



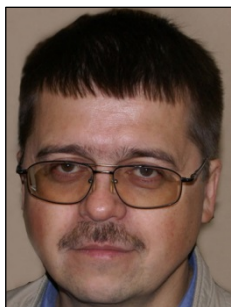
**Полянский Олег Петрович**, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия  
e-mail: [pol@igm.nsc.ru](mailto:pol@igm.nsc.ru)

**Polyansky, Oleg P.**, Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave, Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [pol@igm.nsc.ru](mailto:pol@igm.nsc.ru)



**Семенов Александр Николаевич**, аспирант  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия  
✉ e-mail: [semenov@itam.nsc.ru](mailto:semenov@itam.nsc.ru)

**Semenov, Aleksander N.**, postgraduate student  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave, Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia  
✉ e-mail: [semenov@itam.nsc.ru](mailto:semenov@itam.nsc.ru)



**Владимиров Владимир Геннадьевич**, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия  
e-mail: [vvg@igm.nsc.ru](mailto:vvg@igm.nsc.ru)

**Vladimirov, Vladimir G.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave, Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [vvg@igm.nsc.ru](mailto:vvg@igm.nsc.ru)



**Кармышева Ирина Владимировна**, канд. геол.-мин. наук, н.с.  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия  
e-mail: [iri@igm.nsc.ru](mailto:iri@igm.nsc.ru)

**Karmysheva, Irina V.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave, Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [iri@igm.nsc.ru](mailto:iri@igm.nsc.ru)



**Владимиров Александр Геннадьевич**, докт. геол.-мин. наук, г.н.с., профессор  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия  
Томский государственный университет  
634050, Томск, просп. Ленина, 50, Россия  
e-mail: [vladimir@igm.nsc.ru](mailto:vladimir@igm.nsc.ru)

**Vladimirov, Aleksander G.**, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Professor  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptyug ave, Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia  
Tomsk State University  
50 Lenin ave, Tomsk 634050, Russia  
e-mail: [vladimir@igm.nsc.ru](mailto:vladimir@igm.nsc.ru)



**Яковлев Владислав Александрович**, магистрант, лаборант  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
Новосибирский государственный университет  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия  
e-mail: [yakovlew.official@gmail.com](mailto:yakovlew.official@gmail.com)

**Yakovlev, Vladislav A.**, undergraduate student  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptyug ave, Novosibirsk 630090, Russia  
Novosibirsk State University  
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [yakovlew.official@gmail.com](mailto:yakovlew.official@gmail.com)