



MECHANISMS OF MAGMATIC MINGLING IN COMPOSITE DYKES: MODELS OF DISPERSION AND SHEAR DILATATION

V. G. Vladimirov^{1,2}, V. A. Yakovlev^{1,2}, I. V. Karmysheva^{1,2}

¹*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

Abstract: This article is focused on the intrusion and formation of combined dykes. Two main groups of conventional magmatic mingling are distinguished: (1) plutonic bodies, and (2) combined dykes. The first group is represented by small basite inclusions that are uniformly scattered in granitoid bodies, and includes elongated swarms and tails of small bodies. The second group includes composite dykes with the indicators of mechanical mingling of basic and acid melts. Despite the similarities in the structural and textural features and the indicators of mechanical mingling of melts, these two groups are characterized by clearly different proportions of the volumes of contrasting melts and differ in the duration of formation, place of melt mingling, and tectonic setting. None of the available models was able to explain the occurrence of magmatic mingling structures in individual dykes. In our study, the mingling mechanisms of contrasting melts are discussed using the data on the geological objects located in West Sangilen, an area of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). The general and specific parameters of combined dikes of the Saizyral and Tavyt-Dag sites are considered. The models of shear dilatation and dispersion are proposed for explaining the mechanisms of magmatic mingling in combined dykes.

Key words: mingling; combined dike; net-veined intrusion; shear zone; tectono-magmatic evolution; Sangilen; South-East Tuva

RESEARCH ARTICLE

Received: December 21, 2018

Revised: March 26, 2019

Accepted: April 3, 2019

For citation: Vladimirov V.G., Yakovlev V.A., Karmysheva I.V., 2019. Mechanisms of magmatic mingling in composite dykes: models of dispersion and shear dilatation. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 325–345. doi:10.5800/GT-2019-10-2-0417.

МЕХАНИЗМЫ МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА В КОМПОЗИТНЫХ ДАЙКАХ: МОДЕЛИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И СДВИГОВОЙ ДИЛАТАЦИИ

В. Г. Владимиров^{1,2}, В. А. Яковлев^{1,2}, И. В. Кармышева^{1,2}

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы интродуирования и становления комбинированных даек. Условно магматический минглинг разделен на две основные группы. Первая группа («плутоническая») – это небольшие базитовые включения, равномерно распределенные в объеме гранитоидных тел, либо вытянутые рои и шлейфы мелких тел. Вторая группа («комбинированные дайки») представлена композитными дайками, в пределах которых наблюдаются признаки механического смешения базитовых и кислых расплавов. Несмотря на сходство структурно-текстурных особенностей и признаков механического смешения расплавов, обе группы имеют явные различия: пропорции объемов контрастных расплавов, длительность становления, место смешения расплавов, тектонические обстановки. Существующие модели не могут объяснить появление структур магматического минглинга в отдельных дайках. В данной работе вопросы механизмов смешения контрастных по составу расплавов рассмотрены на примере геологических объектов Западного Сангилен (ЦАСП). Рассмотрены общие и частные параметры комбинированных даек участков «Тавыт-Даг» и «Сайзырал». Предложены модели сдвиговой дилатации и диспергирования для объяснения механизмов магматического минглинга в композитных дайках жильного типа.

Ключевые слова: минглинг; комбинированная дайка; сетчатая интрузия; сдвиговая зона; тектономагматическая эволюция; Сангилен; Юго-Восточная Тува

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди фундаментальных проблем, связанных с вопросами интродуирования и становления магматических расплавов, особое место занимают исследования природы магматических тел, известных как «магматический минглинг» и представляющих собой механическую смесь контрастных по составу расплавов. Интерес к данной проблеме отражен в обзорах [Wilcox, 1999; Sklyarov, Fedorovskii, 2006; Karmysheva et al., 2015; и др.] и многочисленных публикациях [Windley, 1965; Wiebe, 1973; Gamble, 1979; Marshall, Sparks, 1984; Furman, Spera, 1985; Frost, Mahood, 1987; Cook, 1988; Huppert, Sparks, 1988; Didier, Barbarin, 1991; Zanzvilevich et al., 1991; Litvinovsky et al., 1995a, 1995b, 2017; Nardi, de Lima, 2000; Perugini, Poli, 2005; Dokukina, Vladimirov, 2005; Burmakina, Tsygankov, 2013; Vladimirov et al., 2016, 2017; Khromykh et al., 2017; и др.]. Актуальность подобных исследований обусловлена уникальной природой магматического минглинга, являющегося индикатором условий сосуществования контрастных по составу (салических и базитовых) расплавов. Сложность проблемы состоит в том, что подобные условия могут возникать различными способами, на различных уровнях земной коры, как в плутонических, так и в дайковых комплексах.

В данной работе основной акцент сделан на диагностике механизмов возникновения магматического минглинга в жильных и дайковых телах, известных также как композитные или сетчатые интрузии. Предварительно будет обоснован выбор именно данного типа объектов, а также дана их характеристика на примере даек Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува). На основании конкретного фактического материала будет изложена модель, непротиворечиво объясняющая проявление в дайковых телах одного региона не менее двух механизмов смешения контрастных по составу расплавов.

2. ДВЕ ГРУППЫ МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА

Традиционно магматический минглинг разделяется на две основные группы [Sklyarov, Fedorovskii, 2006; Vladimirov et al., 2016].

Первая группа («плутоническая») – это базитовые включения и тела от первых сантиметров до нескольких десятков метров, распределенные в объеме гранитоидных тел, либо сконцентрированные в их пределах в форме вытянутых роев и шлейфов. Часто это бескорневые тела базитов с признаками гибридизации и совместного течения с

кислыми породами. Существование свидетельств инъецирования базитов в магматические камеры гранитоидного состава, находящихся на различных стадиях консолидации, известны и неоднократно описаны в литературе [Litvinovsky et al., 1995a, 1995b; и др.].

Вторая группа («комбинированные дайки») – это дайковые комплексы либо отдельные комбинированные (композитные) дайки, в пределах которых наблюдаются признаки механического смешения базитовых и кислых расплавов [Marshall, Sparks, 1984; Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2017; и др.]. Данная группа объектов часто ассоциируется с одновозрастными дайками основного состава без признаков магматического минглинга.

Несмотря на очевидное различие геологических обстановок смешения контрастных расплавов, обе группы объединяет сходство структурно-текстурных особенностей и признаков механического смешения в условиях магматического течения [Cook, 1988; Litvinovsky et al., 1995a; Lowell, Young, 1999; Sklyarov, Fedorovskii, 2006; Karmysheva et al., 2015; и др.]:

1. *Форма базитовых тел.* Мелкие базитовые тела в матриксе гранитоидов имеют овальную либо линзовидную форму, характерную для двух несмешивающихся жидкостей в условиях остывания одной из них.

2. *Реологическое поведение.* Контрастные по составу породы магматического минглинга одновременно имеют признаки как пластичных, так и хрупкопластичных и хрупких деформаций. Различное реологическое поведение контролируется, в первую очередь, более высокой температурой ликвидуса и размером отдельных фрагментов (порций) основного расплава. Их последовательная кристаллизация во вмещающей салической магме в условиях магматического течения обеспечивает сосуществование пластичных и хрупких деформаций.

3. *Признаки пластичных деформаций.* Извилистый, пламенеvidный, фестончатый характер границ между базитовыми и кислыми породами; признаки магматического течения и вязкого будинирования.

4. *Признаки хрупкопластичных и хрупких деформаций.* Развитие в телах базитов сети извилистых прожилков кислого состава с образованием сетчатых структур; будинирование; секущие трещины и смещение фрагментов базитового состава; угловатый и остроугольный характер последних и др.

5. *Зоны закалки.* Подобные зоны располагаются только на периферии базитовых тел и отсутствуют на границе с линейными прожилками внутри тел. Такие соотношения указывают на образование зон закалки на начальных стадиях остывания основ-

ной магмы и дезинтеграцию консолидированных базитов еще не застывшим кислым расплавом.

6. *Псевдополифазное внедрение компонентов минглинга.* Типично появление сложных соотношений, напоминающих многофазное внедрение.

7. *Взаимодействие контрастных расплавов.* При взаимодействии контрастных по составу расплавов возможно одновременное протекание двух процессов – химического смешения салических и базитовых расплавов (миксинг, mixing) и их механического смешения (минглинг, mingling).

Численные и аналоговые эксперименты показали [Zimanowski, Büttner, 2002; Polyansky et al., 2017; и др.], что причина сходства магматического минглинга плутонического типа и комбинированных даек заключается в условиях протекания смешения, когда на начальных стадиях базитовые и кислые расплавы незначительно различаются по вязкости и формируют единую гидродинамическую смесь, способную к течению.

Для «плутонической» группы магматического минглинга ранее было предложено несколько моделей, опирающихся преимущественно на плотностные, кристаллизационные и дилатационные эффекты [Litvinovsky et al., 1995a, 1995b; Bindeman, 1995; Castro et al., 2008; Burmakina, Tsygankov, 2013; Polyansky et al., 2017; Khromykh et al., 2017; и др.]. Они позволяют непротиворечиво объяснить возникновение условий для инъецирования базитовых расплавов в магматические камеры гранитоидного состава, а также механизмы внутрикамерного смешения и течения контрастных по составу расплавов.

Для второй группы магматического минглинга, когда смешение контрастных расплавов протекает в ограниченном пространстве в пределах одной комбинированной дайки, однозначного понимания условий и механизмов возникновения магматического течения и смешения контрастных по составу расплавов нет.

Данные вопросы в настоящей статье были рассмотрены на примере магматического минглинга в ранних каледонидах Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) [Vladimirov et al., 2005, 2017; Karmysheva et al., 2015; Polyansky et al., 2017; Tsygankov et al., 2019; и др.]. При постановке исследований была поставлена задача выявить в первую очередь не сходство, а различия между двумя группами магматического минглинга. Как следствие, было обращено внимание на три критических момента, позволяющих рассматривать данные группы магматического минглинга отдельно.

Первым ключевым моментом в отличии магматического минглинга, который мы можем наблюдать в крупных гранитоидных телах, от комбинированных базит-гранитоидных даек, является ма-

мый размер и относительная изолированность дайковых комплексов от внешних тепловых источников. Как следствие, консолидация гранитоидной составляющей и комбинированной дайки в целом будет происходить существенно быстрее, чем консолидация минглинга в пределах крупных магматических камер кислого состава. Особенно это касается верхних (гипабиссальных) уровней земной коры. Иными словами, времени для сосуществования и, тем более, для активного механического смешения контрастных расплавов в дайковых комплексах практически нет.

Вторым ключевым моментом в различии классического «плутонического» магматического минглинга и комбинированных даек является разнообразие источников расплава кислого состава. Если для магматических камер он изначально известен – это собственно внутрикамерные магмы кислого состава, то для комбинированных даек их происхождение может быть различным.

Третий ключевой момент заключается в отличии места смешения контрастных расплавов. При классическом «плутоническом» магматическом минглинге это внутрикамерные события. В случае комбинированных базит-гранитоидных даек смешение контрастных расплавов может происходить в промежуточной камере с последующим транспортом контрастной смеси расплавов в виде эмульсии, в подводящем канале, непосредственно в пределах дайки.

Существующие различия позволяют говорить, что модели, описывающие механизмы взаимодействия контрастных по составу расплавов в «плутонической» группе магматического минглинга, с высокой долей вероятности, не будут корректны в случае комбинированных даек.

В настоящей работе вопросы механизмов смешения контрастных по составу расплавов в условиях становления одиночных комбинированных даек рассмотрены на примере геологических объектов Западного Сангилен (ЦАСП). На данной территории в пределах Эрзинской тектонической зоны известны и детально описаны многочисленные базитовые и комбинированные габбро-гранитные дайки [Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2017; и др.]. Наиболее информативными для иллюстрации возможных механизмов формирования минглинг-структур являются комбинированные дайки участков «Сайзырал» и «Тавыт-Даг».

3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Характерной чертой магматизма Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) (рис. 1) является широкое распространение процессов магматического

минглинга на рубеже 495–485 млн лет [Izokh et al., 2004; Vladimirov et al., 2005, 2017; Karmysheva et al., 2015; Tsygankov et al., 2019; и др.]¹. Его значимость для понимания коллизионных и позднеколлизионных событий региона несомненна, поскольку он отражает синхронность магматических, тектонических и геодинамических процессов [Vladimirov et al., 2017; Vladimirov, 2017]. Несомненна также петрологическая значимость магматического минглинга – он служит прямым и наиболее очевидным геологическим свидетельством сосуществования очагов базитовых (мантийных) и салических (коровых) магм, а также их активного взаимодействия [Tsygankov et al., 2019].

Выбранные для изучения композитные дайки участков «Тавыт-Даг» и «Сайзырал» расположены на правом берегу реки Эрзин примерно в одном километре друг от друга (рис. 2). Их объединяет сходная геологическая ситуация [Vladimirov et al., 2017]:

- *единая геодинамическая обстановка* – позднеколлизионный этап растяжения;
- *общая тектоническая позиция* – они расположены в пределах Эрзинской тектонической зоны сдвигового генезиса;
- *узкий возрастной интервал формирования* – 495–485 млн лет;
- *единый уровень глубинности* тектономагматических процессов – граница средней и нижней коры, степень метаморфизма вмещающих пород соответствует верхам эпидот-амфиболитовой, низам амфиболитовой фации;
- *высокая скорость процессов* – признаки синхронных сейсмостектонических явлений.

Несмотря на сходство геологической ситуации, петрогеохимические характеристики², строение даек и механизмы магматического смешения для двух участков различны. Для иллюстрации этого необходимо обратиться к деталям геологического строения даек.

3.1. УЧАСТОК «САЙЗЫРАЛ»

Минглинг-дайка участка «Сайзырал» расположена в экзоконтакте Матутского гранитоидного массива среди мигматитов и параавтохтонных гранитоидов эрзинского метаморфического комплекса (рис. 2, 3). Это крупная дайка субширотного простирания мощностью до 5 м. Ее контакты с вмещающими породами характеризуются отсутствием

¹ Изученность, геологическое строение, коллизионные процессы и эволюция региона рассмотрены в многочисленных работах, обзор которых приведен в [Vladimirov et al., 2005, 2017; Karmysheva et al., 2015; и др.].

² Петрогеохимические характеристики и их анализ изложены в работе [Tsygankov et al., 2019].

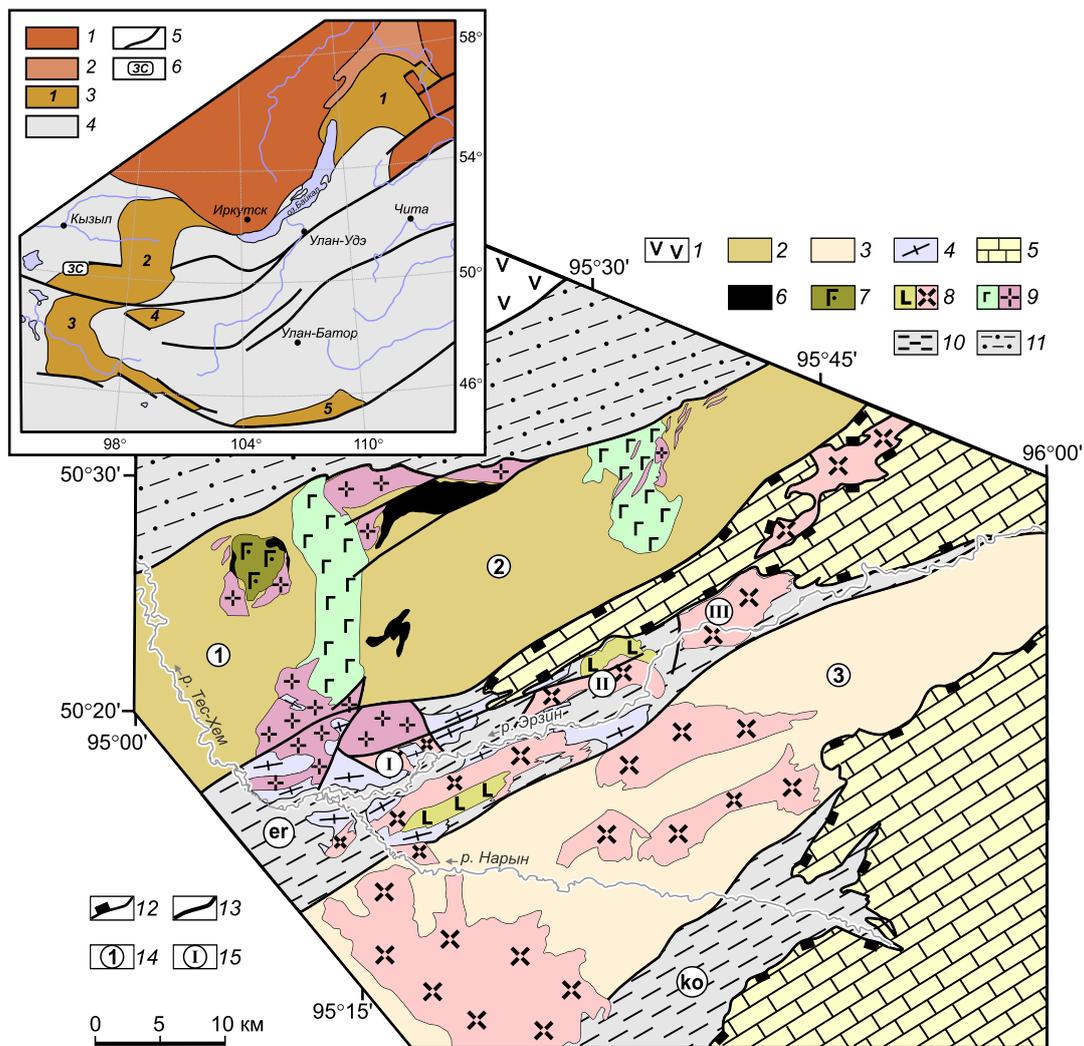


Рис. 1. Геологическая схема Западного Сангилен (Юго-Восточная Тува) (по [Vladimirov et al., 2005, 2017; Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2017]).

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 – актовраковский дунит-гарцбургитовый комплекс, 7 – правотарлашкинский анортозит-габбро-норитовый 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 суртурный 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.

Врезка: Положение Западного Сангилен в структурах южного обрамления Сибирской платформы (по [Kuzmichev et al., 2001; Kuzmichev, 2004; Karmysheva et al., 2015] с упрощениями). 1 – Сибирский кратон; 2 – пассивные окраины; 3 – докембрийские террейны (1 – Байкало-Муйский пояс, 2 – Тувино-Монгольский массив, 3 – Дзабханский массив, 4 – Тарбагатайский массив, 5 – Центрально-Монгольский массив); 4 – палеозойды Центрально-Азиатского складчатого пояса; 5 – разломы; 6 – положение Западного Сангилен.

Fig. 1. Schematic geological map of West Sangilen (Southeastern Tyva, Russia) after [Vladimirov et al., 2005, 2017; Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2017].

1 – formations of the Tannuola island arc; metamorphic complexes (2–4): 2 – Mugar, 3 – Nizhny Erzin, 4 – Erzin; 5 – carbonate-terrigenous cover (Sangilen series); magmatic complexes and series (6–9): 6 – Aktovrak dunite-harzburgite complex, 7 – Pravotarlashka anorthosite-gabbro-norite complex, 8 – Bayankol gabbro-monzodiorite-granosyenite (granodiorite)-granite-leucogranite complex, 9 – Bashkymugur gabbro-monzodiorite-granite-leucogranite complex; 10 – blastomylonites of tectonical zones: er – Erzin, ko – Kokmolgargin; 11 – Agardag suture; 12 – boundaries of tectonic covers; 13 – faults; 14 – tectonic blocks (1–3): 1 – Tarlashkin, 2 – Muguro-Chinchilig, 3 – Erzin-Naryn; 15 – granitoid massifs (I–III): I – Matut gneiss-granite massif, II – Bayankol gabbro-monzodiorite-granodiorite-granite massif; III – Nizhneulor granite massif.

Inset: Position of West Sangilen in the southern framework of the Siberian platform (simplified after [Kuzmichev et al., 2001; Kuzmichev, 2004; Karmysheva et al., 2015]). 1 – Siberian craton; 2 – passive margins; 3 – Precambrian terranes (1 – Baikal-Muya belt, 2 – Tyva-Mongolian massif, 3 – Dzabkhan massif, 4 – Tarbagatai massif, 5 – Central Mongolia massif); 4 – paleozooids of the Central Asian Orogenic Belt; 5 – faults; 6 – position of West Sangilen.

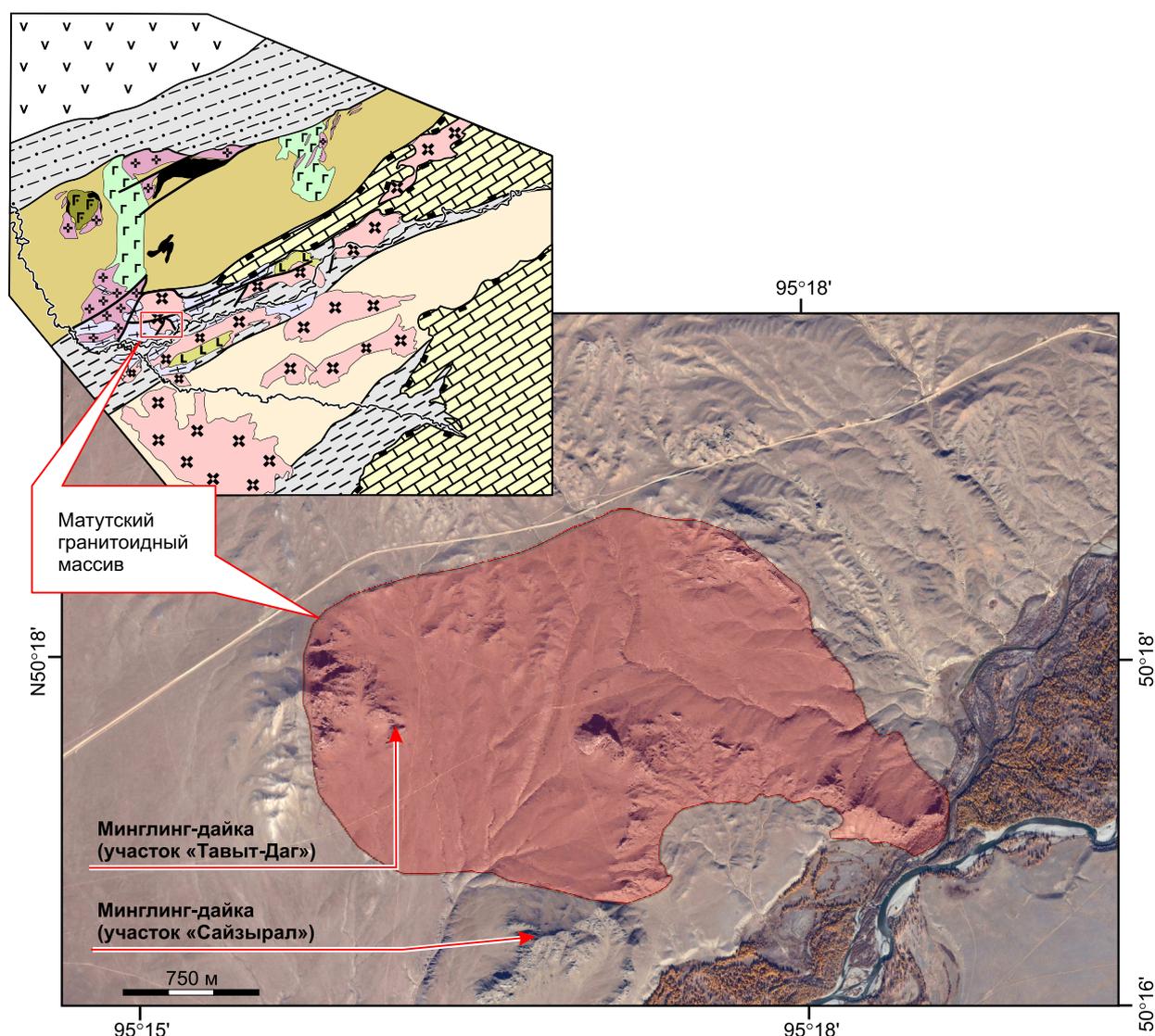


Рис. 2. Положение опорных участков «Сайзырал» и «Тавыт-Даг». Контуры Матутского гранитоидного массива показаны на снимках сервиса Microsoft Bing Maps. Условные обозначения к врезке см. на рис. 1.

Fig. 2. Locations of the Saizyral and Tavyt-Dag sites. The Matut granitoid massif is contoured in the images provided by Microsoft Bing Maps. See the inset in Fig. 1 for the legend.

зон закалок, «заливами» и взаимными проникновениями (рис. 4). Характерно появление пегматоидных обособлений в краевой части «заливов», проникающих в мигматиты (рис. 4). Контакты с гнейсами отчетливые, но их форма в виде «заливов» и апофизов, завершающихся пегматоидными обособлениями (рис. 4), подчеркивает существование на момент внедрения и становления композитной дайки обстановок растяжения.

Распределение салической и базитовой компоненты композитной дайки крайне неравномерное и отражает процессы постинъекционного гравитационного осаждения и перемещения более плотной базитовой магмы и ее консолидированных фрагментов вдоль подошвы дайки (см. рис. 3). На наличие незначительного вязкого «сползания» ба-

зитовой магмы и ее консолидированных фрагментов указывает появление концентрической отдельности, напоминающей течение в лавовом потоке (рис. 5).

Снизу вверх в пределах минглинг-дайки выделяются три зоны: мафическая; промежуточная, активно насыщенная телами базитов; и салическая (см. рис. 3).

В мафической зоне сосредоточена большая часть базитовой составляющей дайки (80–90%). Гранитоиды здесь выполняют редкие и мелкие прожилки в базитах, формируя сетчатую текстуру. Характерной особенностью являются извилистые формы контактов крупных базитовых тел как в основании, так и в кровельной части зоны (см. рис. 3).

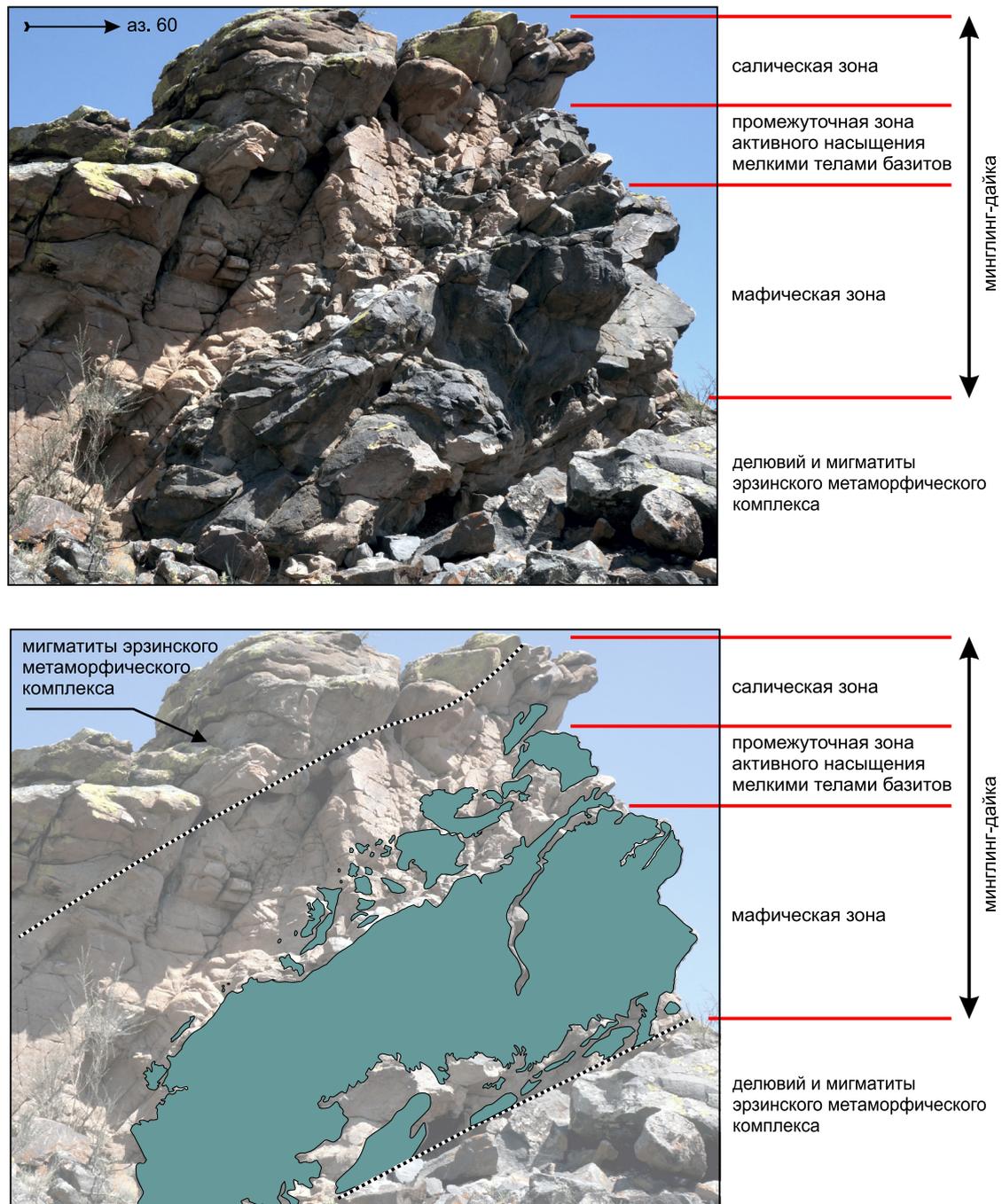


Рис. 3. Внешний вид и строение минглинг-дайки участка «Сайзырал». Гравитационное «оползание» базитовых магм и консолидированных фрагментов с расслоением дайки на три зоны.

Fig. 3. Mingling dykes (Saizyral site). Gravitational 'sliding' of basite magmas and consolidated fragments, and stratification of the dyke into three zones.

Промежуточная зона сложена преимущественно кислым материалом. Она включает в себя базитовые тела разнообразной формы и размеров: овальные, изометричные, неправильные образования от первых миллиметров до полуметра в длину (см. рис. 3, рис. 6). Следует отметить, что остроугольных блоков и фрагментов, сетчатых текстур здесь не наблюдается, т.е. они не претерпели постконсолидационные хрупкие деформации, как крупные

тела в мафической зоне. В то же время в промежуточной зоне наблюдаются признаки смещения состава или гибридации базитовых включений (рис. 6, в).

В салической зоне также встречаются включения основного состава, но их размер очень мал – от первых миллиметров до 1–2 см.

Текстурно-структурные характеристики минглинг-дайки участка «Сайзырал» однозначно указы-

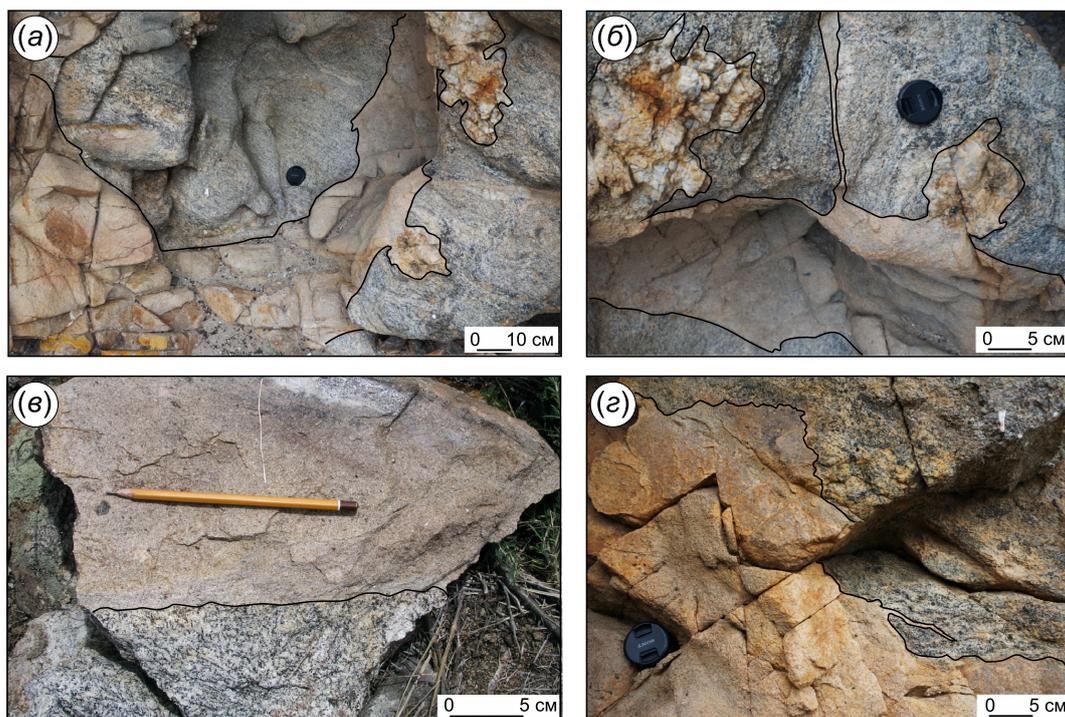


Рис. 4. Форма контакта в подошве композитной дайки (а-з) участка «Сайзырал». Взаимное проникновение салической части дайки и вмещающих мигматитов, автохтонных гранитоидов (а, б, з). Следует обратить внимание на концентрацию пегматоидных пород в краевой части апофизов (а, б).

Fig. 4. Contact at the bottom of the composite dyke (a-z) (Saizyral site). Interpenetrated salic part of the dyke and host migmatites and autochthonous granitoids (a, б, z). Note the pegmatoid rocks concentrated at the margins of the apophyses (a, б).

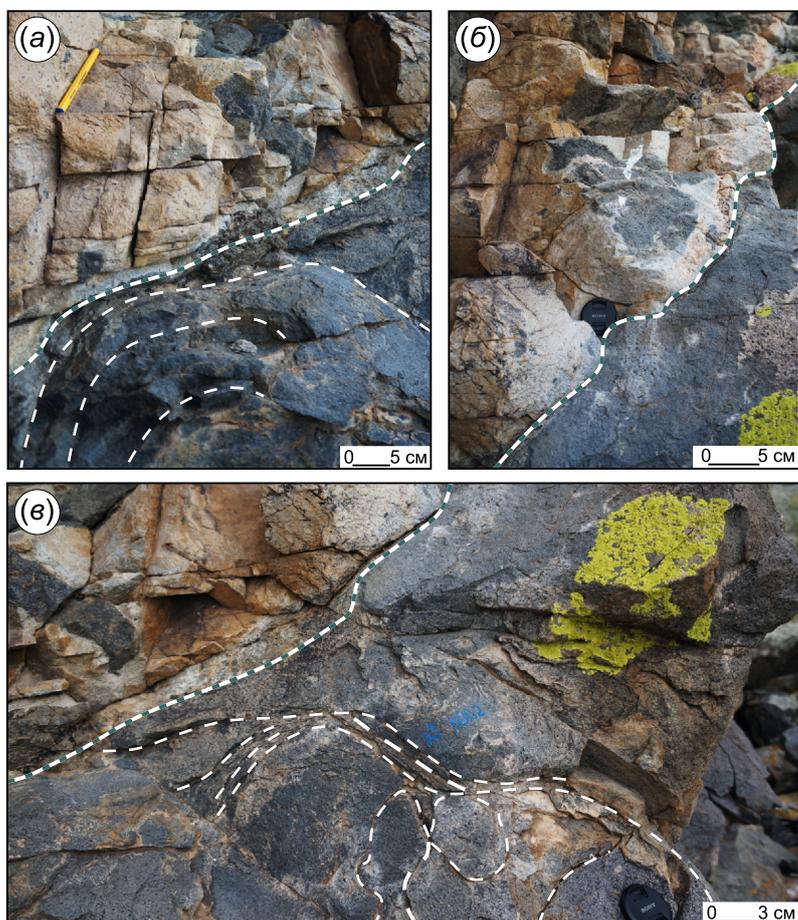


Рис. 5. Внутренние текстуры и границы базитовых тел минглинг-дайки участка «Сайзырал» (а-в). Концентрические и шаровидные текстуры (а, б) в крупных фрагментах базитов минглинг-дайки, идентичные отдельности течения в лавовых потоках.

Fig. 5. Internal textures and the boundaries of the basite bodies of mingling dykes (a-в). Concentric and spherical textures (а, б) in the large fragments of the basite bodies of mingling dykes, identical to separate streams in lava flows.

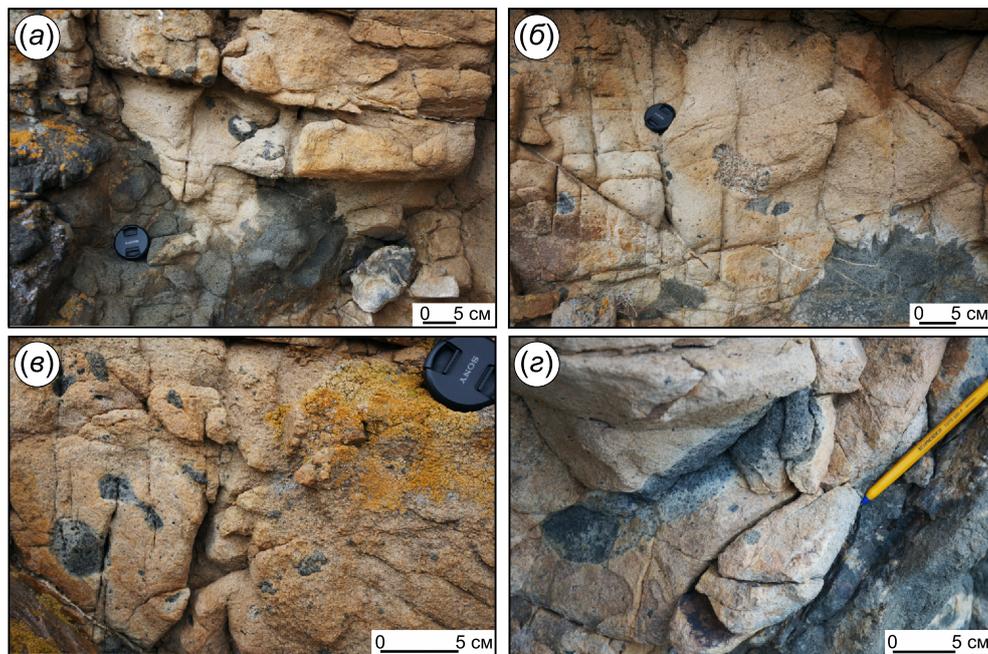


Рис. 6. Насыщение мелкими телами базитов промежуточной зоны минглинг-дайки участка «Сайзырал» (а–г). Следует обратить внимание на отсутствие обломков, сетчатых структур и других признаков хрупких деформаций.

Fig. 6. Saturation with small basite bodies of the intermediate zone of the mingling dyke (a–g) (Saizyral site). Note that debris, reticular structures and any other signs of brittle deformation are absent.

вают на сосуществование контрастных по составу расплавов. Для них характерны признаки смешения пластичных сред с контрастной вязкостью –

лопастевидные, пламенивидные и фестончатые формы (рис. 7) [Litvinovsky et al., 1995a; Sklyarov, Fedorovskii, 2006; и др.].

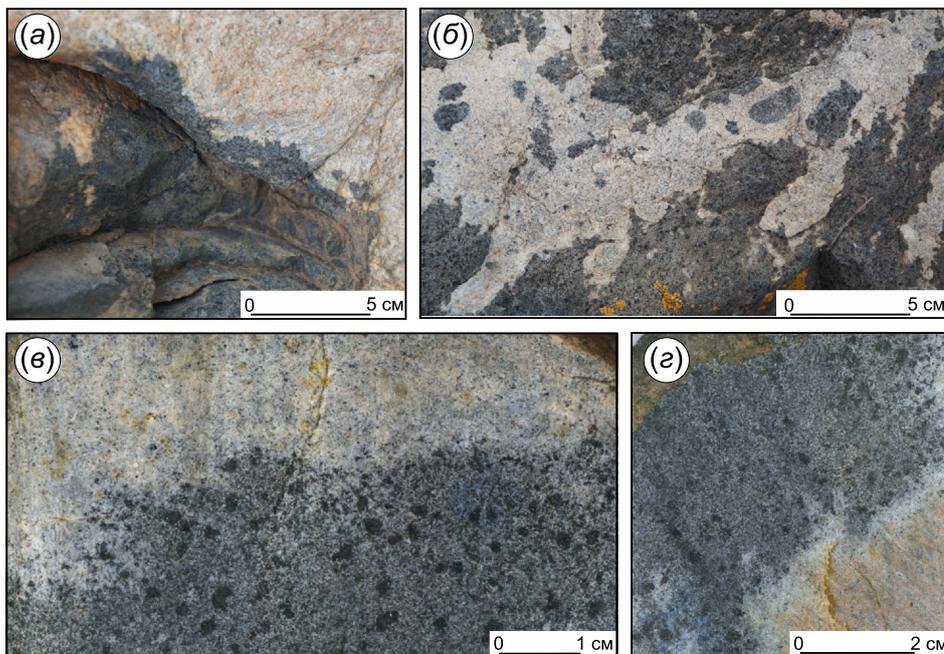


Рис. 7. Взаимоотношения салической и мафической составляющих минглинг-дайки участка «Сайзырал». (а) – фестончатые и пламенивидные формы контактов между базитами и гранитами внутри дайки; (б) – лопастевидные, фестончатые и пламенивидные контакты, округлые нодулы базитов, отделенные от основного тела в гранитах; (в) – фестончатый контакт базитов и гранитоидов с развитием переходной зоны, базиты с гломероскоплениями роговой обманки и биотита; (г) – зона повышенной лейкократовости на контакте контрастных по составу пород.

Fig. 7. Relationships between the salic and mafic components of the mingling dyke (Saizyral site). (a) – festoon- and flame-shaped contacts between basites and granites inside the dyke; (b) – lobe-, festoon- and flame-shaped contacts, and rounded nodules of basites, which are separated from the main body in granites; (в) – festoon-shaped contact of basites and granitoids with the developed transition zone, and basites with congregations of hornblende and biotite; (г) – zone of increased leucocracy at the rock contact of contrasting compositions.

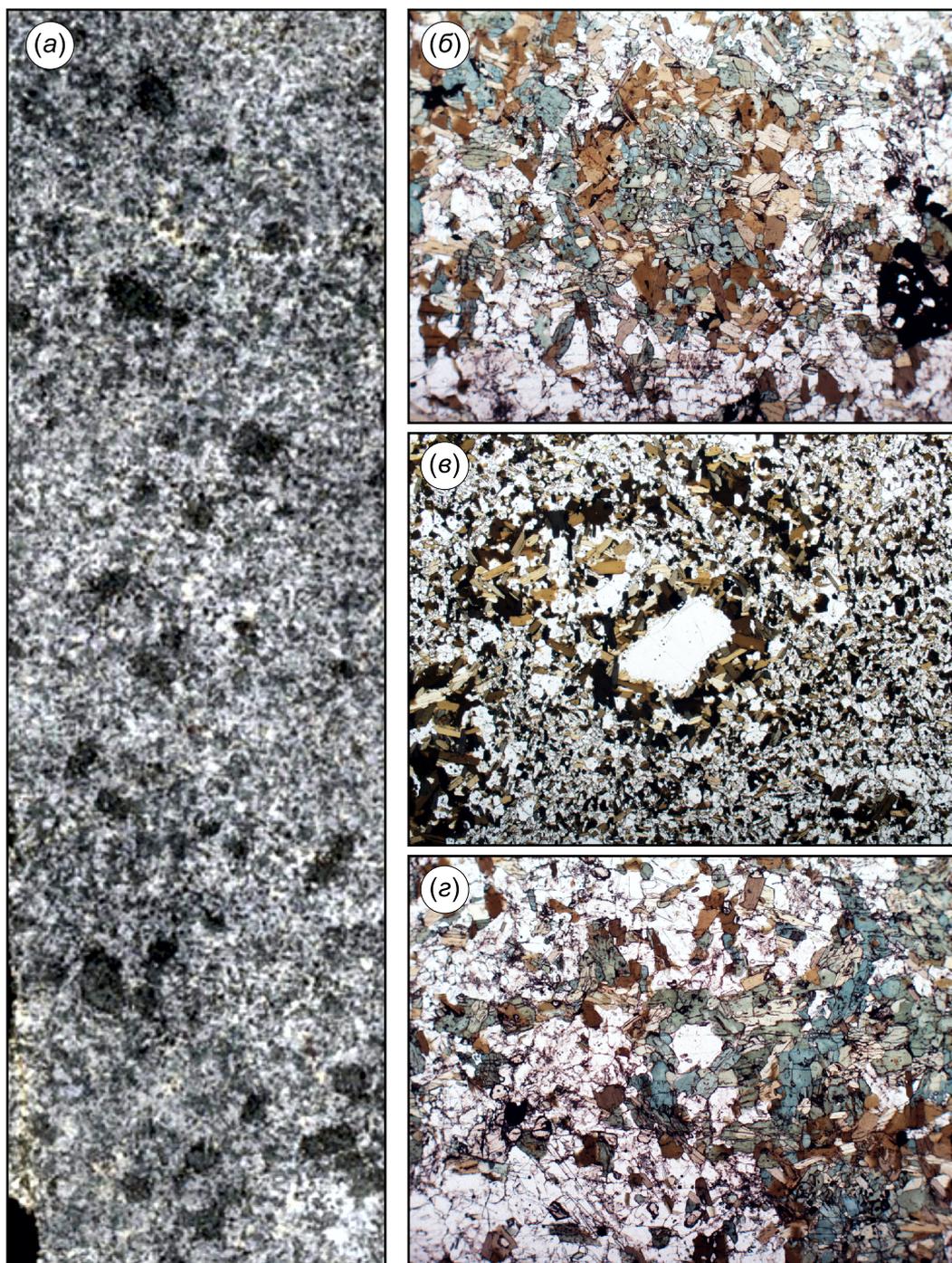


Рис. 8. Морфология и состав базитовых включений в салической зоне минглинг-дайки участка «Сайзырал». (а) – мелкие базитовые включения размером 3–4 мм в пластинке из образца салической части минглинг-дайки; (б–з) – микрофотографии пород салической части минглинг-дайки в проходящем свете.

Fig. 8. Morphology and composition of basite inclusions in the salic zone of the mingling dyke (Saizyral site). (а) – small (3–4 mm) basite inclusions in the sample taken from the salic zone of the mingling dyke; (б–з) – salic zone of the mingling dyke (plane polarized light micrographs).

Однако в условиях предполагаемого течения элементов композитной дайки необходимо обсуждение существования микрогранулярных стяжений базитового состава в салической части (рис. 8), переходных зон и локальных участков перекристаллизации гранитного материала (см. рис. 6,

рис. 7). Последние сложены кварц-плагиоклазовыми радиальными агрегатами, центральная часть которых – аморфная и мелкозернистая, а на периферии наблюдаются более крупнозернистые удлиненные агрегаты плагиоклаза, ориентированные от центров кристаллизации (рис. 9).

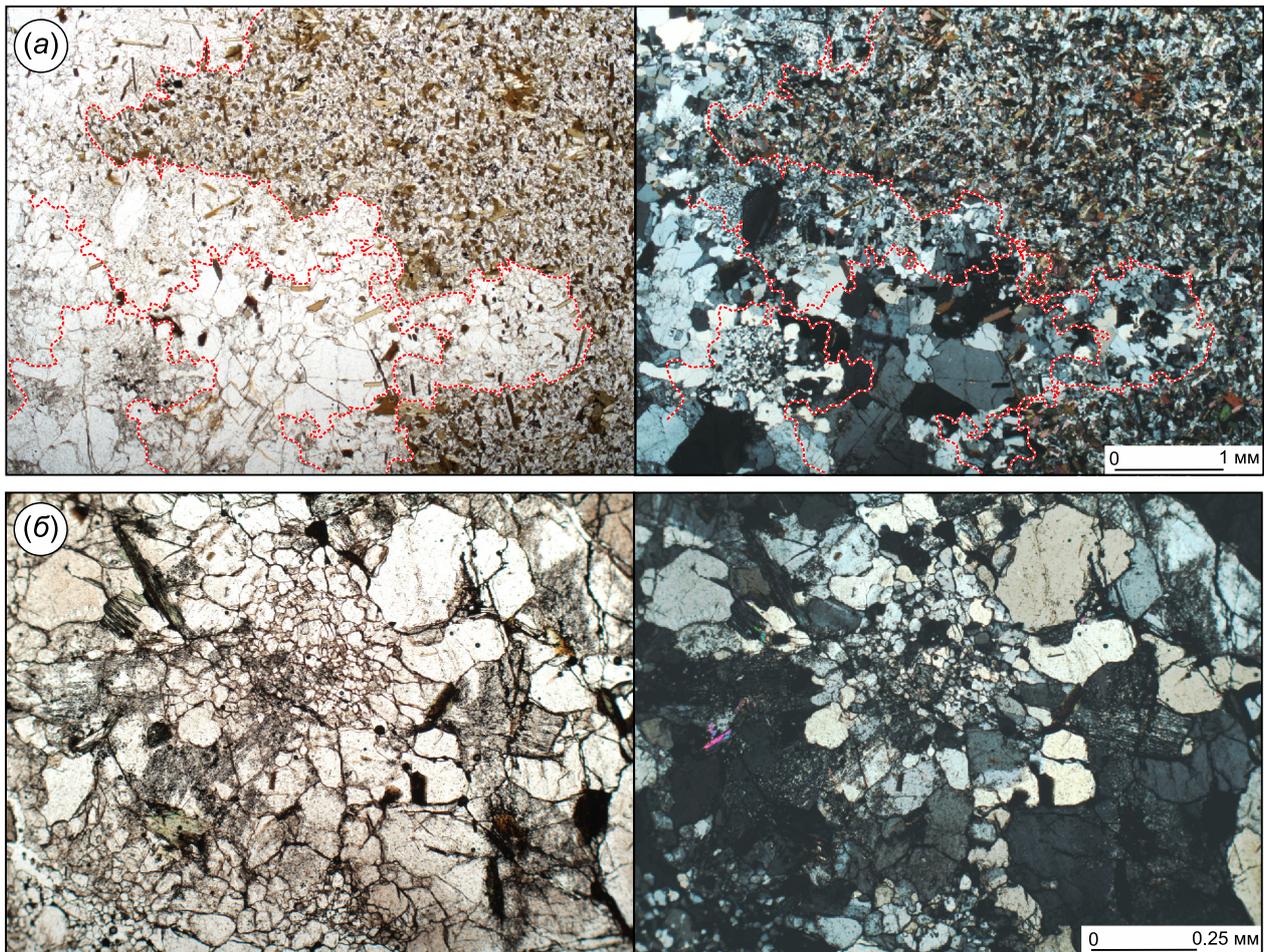


Рис. 9. Переходные зоны между мафической и салической составляющими минглинг-дайки участка «Сайзырал». (а) – образец КТ1000-3, переходные зоны с локальными центрами кристаллизации (слева – PPL, в проходящем свете; справа – XPL, николи скрещены); (б) – образец Y68-1, сферическое образование в точечном центре кристаллизации кварца и плагиоклаза (слева – PPL, в проходящем свете; справа – XPL, николи скрещены). Пунктирными линиями красного цвета выделены переходные области.

Fig. 9. Transition zones between the mafic and salic components of the mingling dyke (Saizyral site). (a) – Sample KT1000-3. Transitional zone with the local centers of crystallization (left – PPL, transmitted-light micrograph; right – XPL, crossed nicols); (b) – Sample Y 68-1. Spherical body in the point center of crystallization of quartz and plagioclase (left – PPL, plane polarized light micrograph; right – XPL, cross polarized light nicols). Transition areas are shown by red dashed lines.

3.2. Участок «Тавыт-Даг»

Комбинированные дайки участка «Тавыт-Даг» расположены в юго-западной эндоконтактовой части Матутского гранитного массива (см. рис. 2). Это серия крутопадающих базитовых даек с субширотным простираем и общей мощностью до 5 м (рис. 10). Минимальный размер композитной жилы с признаками взаимодействия базитовой и салической части составляет всего 15 см × 1 м.

В объеме тела композитной дайки резко преобладают основные породы, а гранитоиды заполняют пространство между фрагментами базитов, образуя сетчатые текстуры (рис. 10, 11). Блоки базитов достигают метра и более в поперечном сечении и занимают более 95 процентов всего объема. В крае-

вой части дайки размер отдельных фрагментов базитов резко уменьшается до десяти сантиметров и менее (рис. 10, з).

Фестончатые и пламенеvidные формы минглинг-структур наблюдаются локально, преимущественно в узкой зоне висячего блока между контактом с гранитами Матутского массива и основным телом базитов композитной дайки (рис. 11).

Для всех типов контактов между салической и базитовой частью характерно отсутствие зон переходного состава, ороговикования и контактовых изменений. Однако в области появления фестончатых и пламенеvidных контактов салическая часть характеризуется мелкозернистой структурой с признаками директивности вдоль контактов композитной дайки. Следует отметить, что именно

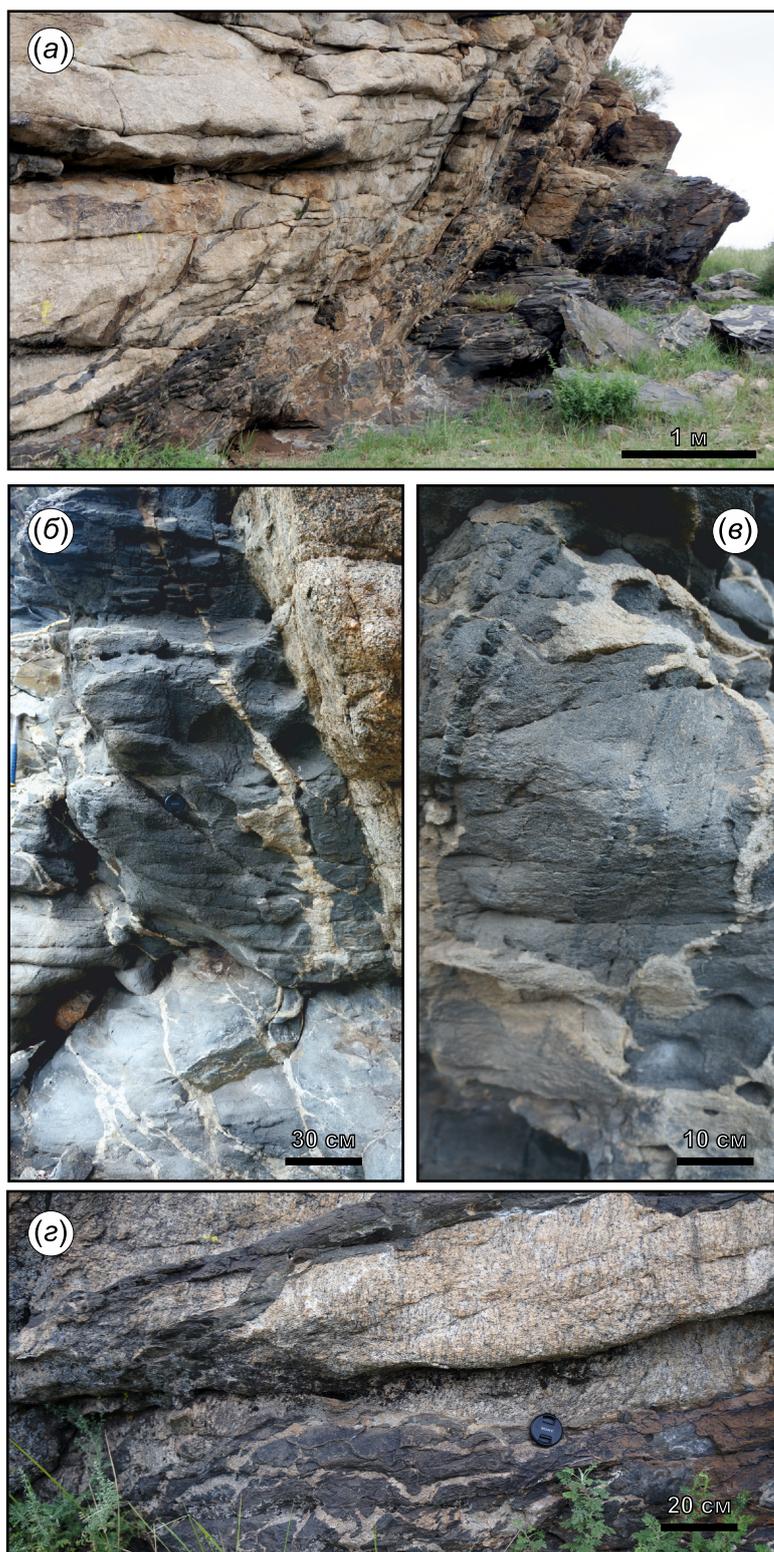


Рис. 10. Минглинг-дайки участка «Тавыт-Даг». (а) – внешний вид дайки; (б) – синкинематические сетчатые текстуры; (в) – син-инъекционная магматическая полосчатость; (г) – эшелонированные базитовые дайки, секущие полосчатые гнейсовидные граниты Матутского массива. Следует обратить внимание на сочетание композитных даек с сетчатыми текстурами и дайками базитов без минглинг-структур.

Fig. 10. Mingling dykes (Tavuyt-Dag site). (a) – exterior of the dyke; (b) – syn-kinematic reticular textures; (c) – syn-injection magmatic banding; (d) – layered basite dykes that cut the banded gneissoid granites of the Matut massif. Note a combination of composite dikes with reticular textures and basite dykes without mingling structures.

здесь происходит резкое уменьшение размеров отдельных фрагментов базитового состава, они теряют признаки хрупких деформаций, но приобретают признаки пластичного поведения.

В отличие от предыдущего участка, на участке «Тавыт-Даг» отсутствуют значимые признаки протекания совместных с вмещающими породами вязких деформаций. Все контакты дайки, по отноше-

нию к более ранним гранитоидам Матутского массива, секущие. Очевидно, что происхождение данной эшелонированной системы базитовых и композитных даек тесно связано с трещинами растяжения и хрупкими нарушениями в теле гранитоидов и имеет наложенный (поздний) характер (см. рис. 10). Действительно, в поперечных субвертикальных сечениях композитной дайки можно

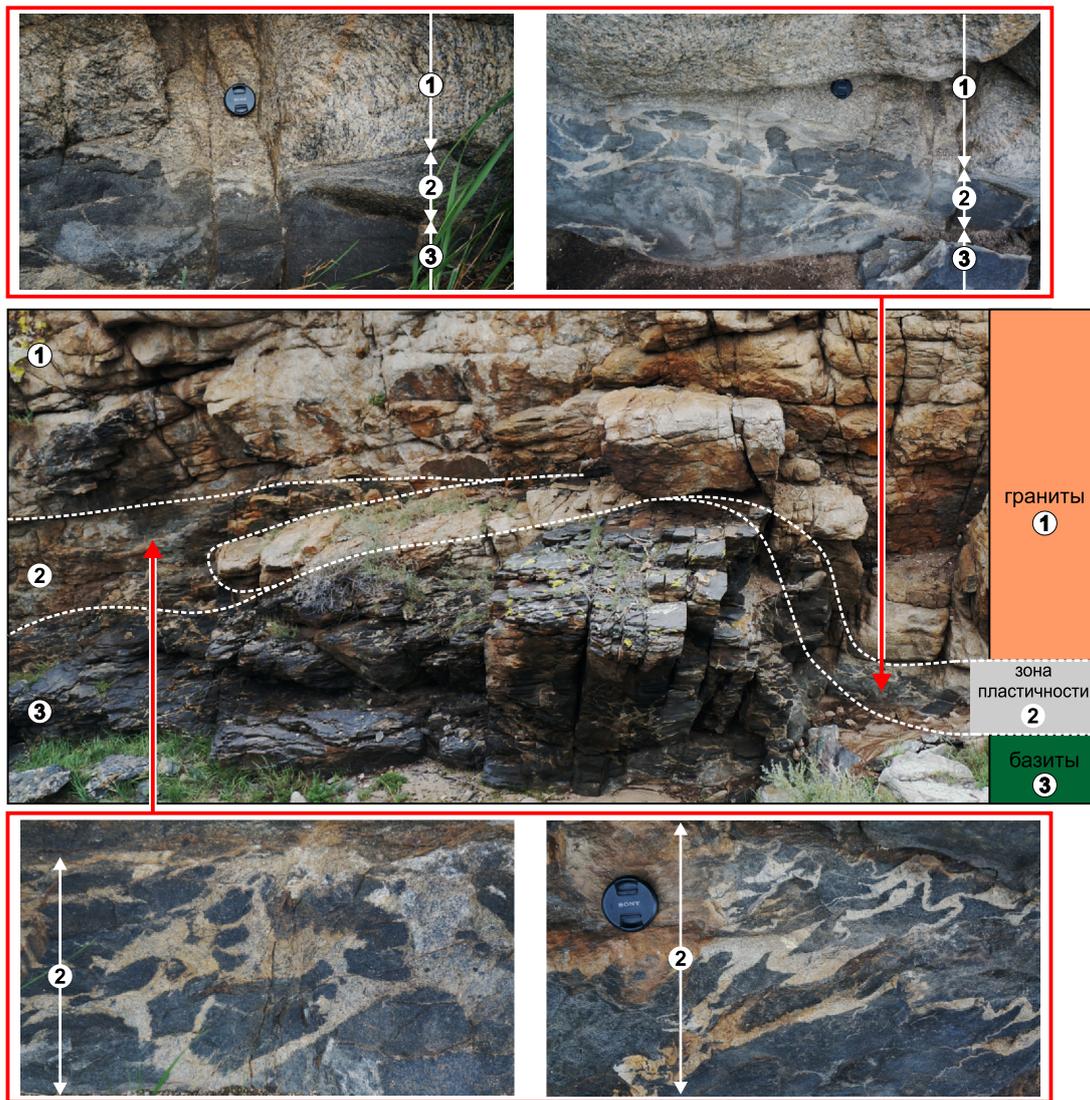


Рис. 11. Зона пластичности в краевой части минглинг-дайки (участок «Тавыт-Даг»).

1 – граниты Матутского массива; 2–3 – минглинг-дайка: 2 – зона пластичности в краевой части минглинг-дайки на границе с гранитами Матутского массива, 3 – осевая часть минглинг-дайки базитового состава со структурами сетчатого типа или без признаков деформаций. Центральная часть рисунка – общий вид обнажения (субвертикальная стенка). На врезках – увеличенные фрагменты, иллюстрирующие фестончатые, пламеневидные и лопастевидные формы контактов базитов и гранитов в зоне пластичности.

Fig. 11. The zone of plasticity at the marginal part of the mingling dyke (Tavvyt Dag site).

1 – granites of the Matut massif; 2–3 – mingling dyke: 2 – zone of plasticity at the marginal part of the mingling dyke (at the contact with granites of the Matut massif), 3 – axial part of the basite mingling dyke with reticular structures and without any indicators of deformation. Figure center: outcrop (subvertical wall). Insets: zoomed-in photos of festoon-, flame- and lobe-shaped contacts of basites and granites in the zone of plasticity.

видеть, что при формировании сетчатых текстур салическая часть пассивно заполняет трещины растяжения сдвигового генезиса с субвертикальной взбросо-сбросовой кинематикой (см. рис. 10, б).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже упоминалось выше, минглинг-дайки на участках «Сайзырал» и «Тавыт-Даг» формирова-

лись в единой геодинамической обстановке на рубеже 495–485 млн лет. На фоне активизации позднеколлизийных тектонических движений происходило «вскрытие» глубинных очагов основных магм, перемещение и внедрение последних в пределах Эрзинской сдвиговой зоны с формированием многочисленных базитовых дайковых комплексов и габбро-гранитных ассоциаций. Можно было ожидать, что на рассматриваемом эрозионном уровне будем иметь дело с однотипными композит-

ными дайками как по петрогеохимическому составу, так и по внутреннему строению и механизмам становления. Однако ситуация оказалась более сложной. Попробуем с учетом опубликованных данных [Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2017; Tsygankov et al., 2019; и др.] показать в форме таблицы основные различия между ними (таблица).

Как можно видеть, строение, состав, источники базитовых и кислых расплавов, тектоническая позиция и механизмы минглинга для данных композитных даек по многим параметрам различны.

Касательно петрогеохимических и минеральных характеристик даек следует согласиться с А.А. Цыганковым и Г.Н. Бурмакиной [Tsygankov et al., 2019], показавшими, что при кардинальных различиях содержания индикаторных элементов (Rb, Nb, Ta, Zr, Hf) и величин отношений Nb/Y, Zr/Y, Th/Ta, Zr/Nb, Nb/Th можно считать, что для базитов участков «Сайзырал» и «Тавыт-Даг», вероятно, существовали разноглубинные мантийные источники. Однако возможно некоторое уточнение причин, механизмов и динамики возникновения различий в составе верхнемантийного субстрата базитовых расплавов. Необходимо вспомнить, что появление дайковых комплексов в пределах региона обусловлено началом активных субгоризонтальных тектонических движений на позднеколлизийном этапе (их источником были возмущения на границе коровой и мантийной литосферы), обеспечивших растяжение и фрагментацию коры даже на ее нижних уровнях. Об этом свидетельствуют прямые геологические признаки глубинных сейсмотектонических процессов, основной пик которых пришелся на рубеж 485 млн лет. Так, в районе п. Эрзин обнаружен сейсмотектонический меланж гранулитов и амфиболитов эрзинского метаморфического комплекса. Породы меланжа секутся гранитной дайкой, возраст которой составляет 485 млн лет (ЛА-ИСП-МС, циркон [Karmysheva et al., 2015]).

Иными словами, можно предположить, что на начальном этапе позднеколлизийных событий произошла фрагментация коры, в том числе возникновение Матутского тектонического блока, в пределах которого расположен одноименный гранитный массив и собственно композитная дайка участка «Тавыт-Даг». В дальнейшем тектонический блок мог латерально и вертикально тектонически перемещаться, обеспечивая сброс внутрикоровых напряжений. Об этом свидетельствует существование высокотемпературных милонитов и инъекций базитовых и композитных даек по границам тектонического блока (в том числе на участке «Сайзырал»).

Несомненно, литосферное растяжение и перемещение коровых блоков сопровождалось страти-

фикацией верхнемантийных источников, что и было зафиксировано в работе [Tsygankov et al., 2019].

Таким образом, композитные дайки участков «Тавыт-Даг» и «Сайзырал» инъецировались последовательно, но все же в различных тектонических обстановках.

Существующие различия, описанные выше и отмеченные в таблице, позволили предложить для объяснения природы композитных даек два механизма их формирования: механизм «диспергирования» и «сдвиговой дилатации».

4.1. ДИЛАТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА В КОМБИНИРОВАННЫХ ГАББРО-ГРАНИТНЫХ ДАЙКАХ (УЧАСТОК «ТАВЫТ-ДАГ»)

Комбинированные дайки представляют собой продукт двух субсинхронных геологических процессов – синтетектонического инъецирования базитового расплава и теплового воздействия со стороны последних на вмещающие породы.

Синтетектоническое инъецирование базитового расплава обеспечивается условиями так называемой *сдвиговой дилатации*, когда в обстановках сдвига либо транспрессии (сжатие со сдвигом) формируются эшелонированные или единичные трещины растяжения над магматической камерой основного состава. Появление трещин растяжения, с одной стороны, обеспечивает условия для экспонирования базитовых магм, с другой – способствует локальному кратковременному понижению общего литостатического давления в зоне дилатации.

Тепловое воздействие со стороны базитовых даек жильного типа в сочетании с кратковременным понижением литостатического давления вблизи даек приводит к локальному плавлению либо реоморфизму вмещающих пород.

Поскольку жилообразование в условиях сдвиговой дилатации – достаточно кратковременный процесс, происходит восстановление общего литостатического давления, которое далее резко возрастает в связи с объемными эффектами при выплавлении гранитоидов. Автоклавный эффект со стороны кислого расплава на бортах жилы приводит к раздавливанию консолидирующейся базитовой магмы, которая при этом либо пластически деформируется, либо претерпевает хрупкие разрывы с заполнением трещин кислым материалом (рис. 12). Подобное взаимодействие контрастных расплавов приводит к формированию минглинг-подобных структур.

Ограничения и следствия дилатационной модели магматического минглинга. Без проведения численного моделирования можно предположить, что появление минглинг-даек по механизму сдвиговой дилатации возможно лишь в нижнекоровых

Основные различия композитных даек участков «Сайзырал» и «Тавыт-Даг» (Западный Сангилен, ЮВ Тува) с учетом опубликованных данных [Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2017; Tsygankov et al., 2019]

Main differences of composite dykes observed on the Saizyral and Tavyt-Dag sites (West Sangilen, Southeastern Tuva), taking into account published data [Karmysheva et al., 2015; Vladimirov et al., 2017; Tsygankov et al., 2019]

Характеристики	Композитная дайка участка «Сайзырал»	Композитная дайка участка «Тавыт-Даг»
Минералогия и петрогеохимические характеристики [Tsygankov et al., 2019]		
Соотношение КППШ и плагиоклаза в салической части композитных даек	Калиевый полевой шпиг преобладает над плагиооклазом	Плагиооклаз резко преобладает над калиевым полевым шпиготом
Состав плагиооклаза в салической части композитных даек	От 7 до 20 % An	От 26 до 30 % An, вплоть до 45 % An
Состав биотита в салической части композитных даек	Mg# 0.43–0.38 TiO ₂ =3.2–4.4 мас. %	Mg# 0.53–0.48 TiO ₂ =2–4 мас. %
Соотношение амфибола и биотита в базитовой части композитных даек	Соотношение амфибола и биотита определяется наличием переходных (гибридных) зон	Амфибол преобладает над биотитом
Состав роговой обманки в базитовой части композитных даек	Mg# 0.59–0.74 TiO ₂ =0.35–0.98 мас. %	Mg# 0.52–0.57 TiO ₂ =0.73–1.3 мас. %
Состав биотита в базитовой части композитных даек	Mg # 0.62–0.58 TiO ₂ =2.00–2.75 мас. %	Mg # 0.57–0.50 TiO ₂ =2.3–3.9 мас. %
Состав базитовой части композитных даек	Известково-щелочная серия Na ₂ O+K ₂ O=2.6–5.9 мас. % Mg# 54.8–58.9 мол. % Обогащены Nb, Ta, в меньшей мере Zr и Hf Геохимические характеристики тяготеют к источникам OIB типа	Известково-щелочная, щелочно-известковая Na ₂ O+K ₂ O=3.8–6.5 мас. % Mg# 49.5–53.3 мол. % Отрицательные аномалии Nb – Ta и Zr – Hf Обнаруживают присутствие корового компонента в мантийном источнике
Состав салической части композитных даек	Известковые Mg# 34.2–54.7 мол. % K ₂ O/Na ₂ O=0.65–1.41 A/CNK=0.99–1.37 Σ – 157 г/г; La/Yb(n) – 4.4; Eu/Eu* – 0.32 Gd/Yb(n) – 1.08; La/Sm(n) – 2.01	Известковые, известково-щелочные Mg# 36.9–46.1 мол. % K ₂ O/Na ₂ O=0.26–0.34 A/CNK=0.87–1.03 Σ – 245 г/г; La/Yb(n) – 15.1; Eu/Eu* – 0.63 Gd/Yb(n) – 1.96; La/Sm(n) – 3.48

Окончание таблицы

End of Table

Характеристики	Композитная дайка участка «Сайзырал»	Композитная дайка участка «Тавыт-Даг»
Переходные и гибридные зоны и элементы в композитных дайках		
Гломеропорфировые скопления мелких зерен амфибола, окруженные биотитовой каймой, а также крупные округлые зерна кварца, окруженные амфиболовой оторочкой	Большое количество как в базитовой, так и в салической части композитной дайки	Отсутствуют
Гибридизация на контакте салической и базитовой компоненты композитной дайки	Наблюдается	Отсутствует
Общая характеристика		
Соотношение салической и базитовой компонент минглинг-дайки	Соотношение близкое	Базитовая компонента резко преобладает над салической
Вмещающие породы	Метаморфические породы эрзинского комплекса (мигматиты, автохтонные граниты)	Гранитоиды Матутского массива
Структурная позиция по отношению к вмещающим породам	Занимают секундарное положение, однако в подошве композитной дайки совместно с вмещающими породами вовлекаются в вязкие деформации	Занимают секундарное положение по отношению к гранитам Матутского массива
Тектоническая позиция	Минглинг-дайки расположены на границе тектонического блока. Внедрение произошло в ослабленные зоны по его границе при его возможном смещении	Минглинг-дайки расположены внутри тектонического блока. Внедрение происходило в эшелонированные внутриблоковые трещины

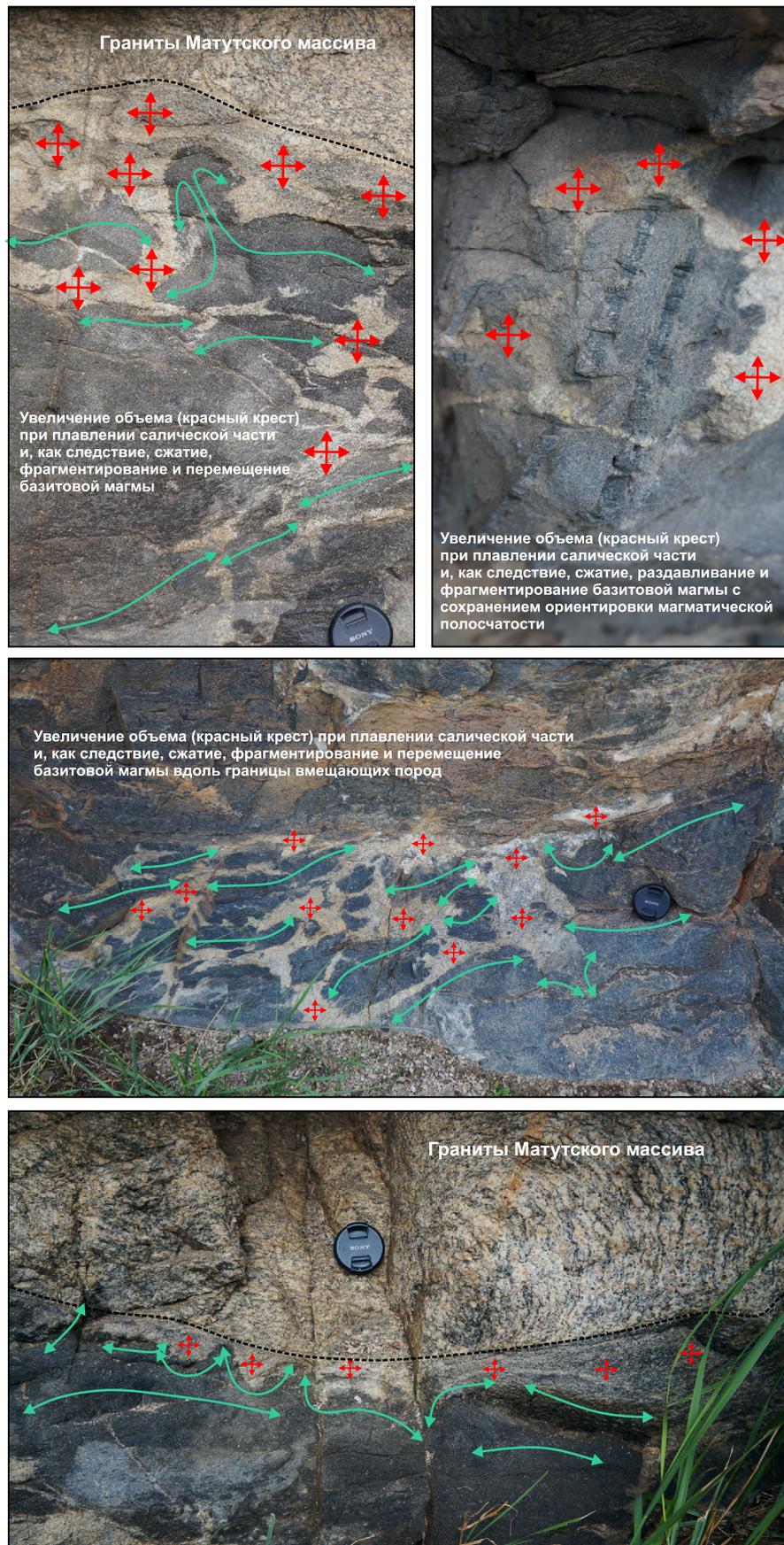


Рис. 12. Геологические свидетельства механизма сдвиговой дилатации при формировании структур магматического минглинга (участок «Тавыт-Даг»).

Fig. 12. Geological evidence for the mechanism of shear dilatation in the formation of magmatic mingling structures (Tavyt-Dag site).

условиях, когда общий уровень температур будет достаточен для частичного плавления вмещающих пород за счет дополнительного теплового воздействия со стороны базитовой интрузии (дайки).

Вторым ограничением и, одновременно, важным следствием предлагаемой модели является приуроченность к обстановкам субгоризонтального сдвига либо транспрессии. Только в этом случае возможно нарушение сплошности кровли базитовой камеры и последующая субвертикальная транспортировка расплава. Подобные геотектонические обстановки возможны лишь на позднеколлизийной стадии эволюции орогенов, что делает комбинированные дайки, сформировавшиеся по данному механизму, важным индикатором подобных условий.

4.2. ДИСПЕРГИРОВАНИЕ КАК МЕХАНИЗМ МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА В КОМБИНИРОВАННЫХ ГАББРО-ГРАНИТНЫХ ДАЙКАХ (УЧАСТОК «САЙЗЫРАЛ»)

Основанием для обсуждения данной модели служат следующие геологические данные:

- Существование огромного количества гломеропорфировых скоплений мелких зерен амфибола, окруженных биотитовой каймой, а также крупных округлых зерен кварца, окруженных амфиболовой оторочкой (см. рис. 3, 6–9).
- Геологические свидетельства гравитационного осаднения и синхронной сортировки «по крупности» фрагментов базитовой магмы (см. рис. 3).
- Признаки «точечных» областей плавления и рекристаллизации (см. рис. 8, 9).
- Сопровождение процесса дайкообразования вязким течением и взаимодействием с породами окружающего матрикса.
- Существование одновозрастных сейсмо-тектонических процессов.
- Приуроченность композитной дайки к сдвиговой зоне (shear zone) в краевой части крупного тектонического блока, находящегося в процессе латерального и, возможно, субвертикального движения.

Предлагаемая модель магматического минглинга достаточно проста, поскольку опирается на комплекс геологических свидетельств. Это механизм сейсмо-тектонического «ударного» воздействия базитовой магмы или расплава на метаморфические или магматические породы, располагающиеся над зоной инъецирования. В условиях нижней коры, теплового воздействия со стороны базитовой камеры и сейсмической энергии происходит как формирование габбро-гранитной суспензии, так и ее транспорт в ослабленные зоны. Поскольку это достаточно кратковременный, но пульсационный (сейсмогенный) процесс, после инъецирования про-

исходит гравитационное осаднение и укрупнение более плотных базитовых компонент в подошве композитной дайки. Мелкие же гломеропорфировые выделения сохраняются во взвешенном виде как в салической, так и в базитовой части дайки.

К важным следствиям данного механизма можно отнести существование неоднородной по составу суспензии, которая при сохранении относительно длительного температурного режима будет служить благоприятной областью для объемного диффузионного выравнивания составов либо плавления с появлением магм промежуточного состава.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детальные полевые исследования и анализ опубликованных материалов по геологическому строению, составу, тектонической позиции и геодинамической обстановке внедрения и становления минглинг-даек опорных участков Западного Сангиленга позволили сделать следующие выводы.

Существуют две группы магматического минглинга – камерный (плутонический) тип и комбинированных даек (жильный тип). Строение, состав, тектонические обстановки и механизмы их формирования различны и требуют специализированных подходов.

Ранние стадии позднеколлизийной эволюции орогенов при смене обстановок сжатия на обстановки сдвигового растяжения могут сопровождаться тектоническим фрагментированием земной коры, в том числе на границе коровой и мантийной литосферы. Индикатором данных событий могут служить комбинированные дайки, формирование которых происходило на глубинных уровнях коры.

Формирование нижнекоровых композитных даек может происходить по механизму «сдвиговой дилатации» либо «диспергирования». Первый механизм наиболее вероятен для внутриблоковых инъекций базитовой расплава, второй реализуется при инъецировании базитовых расплавов по границам тектонических блоков.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.Г. Владимирову, А.Э. Изоху (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), А.А. Цыганкову и Г.Н. Бурмакиной (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ) за обсуждение материалов статьи. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-05-01011, 18-35-00467), ИГМ СО РАН (проект № 0330-2016-0003), а также Министерства образования и науки РФ (проект № 5.1688.2017/ПЧ).

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bindeman I.N., 1995. Retrograde vesiculation of basaltic magma in shallow foci: a model of the origin of melanocratic inclusions in acidic and middle rocks. *Petrologiya (Petrology)* 3 (6), 632–644 (in Russian) [Биндеман И.Н. Ретроградная везикуляция базальтовой магмы в малоглубинных очагах: модель происхождения меланократовых включений в кислых и средних породах // *Петрология*. 1995. Т. 3. № 6. С. 632–644].
- 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>.
- Castro A., Martino R., Vujovich G., Otamendi J., Pinotti L., D'Eramo F., Tibaldi A., Vinao A., 2008. Top-down structures of mafic enclaves within the Valle Fertil magmatic complex (Early Ordovician, San Juan, Argentina). *Geologica Acta* 6 (3), 217–229. <https://doi.org/10.1344/105.000000252>.
- Cook N.D.J., 1988. Diorites and associated rocks in the Anglem Complex at The Neck, northeastern Stewart Island, New Zealand: an example of magma mingling. *Lithos* 21 (4), 247–262. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(88\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(88)90031-X).
- Didier J., Barbarin B. (Eds.), 1991. Enclaves and Granite Petrology. Developments in Petrology. Vol. 13. Elsevier, Amsterdam, 625 p.
- Dokukina K.A., Vladimirov V.G., 2005. Tectonic fragmentation of basaltic melt. *Doklady Earth Sciences* 401 (2), 182–186.
- Frost T.P., Mahood G.A., 1987. Field, chemical, and physical constraints on mafic-felsic magma interaction in the Lamarck Granodiorite, Sierra Nevada, California. *Geological Society of America Bulletin* 99 (2), 272–291. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1987\)99<272:FCAPCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1987)99<272:FCAPCO>2.0.CO;2).
- Furman T., Spera F.J., 1985. Co-mingling of acid and basic magma with implications for the origin of mafic I-type xenoliths: field and petrochemical relations of an unusual dike complex at Eagle Lake, Sequoia National Park, California, USA. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 24 (1–2), 151–178. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(85\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(85)90031-9).
- Gamble J.A., 1979. Some relationships between coexisting granitic and basaltic magmas and the genesis of hybrid rocks in the Tertiary central complex of Slieve Gullion, northeast Ireland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 5 (3–4), 297–316. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(79\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(79)90021-0).
- Huppert H.E., Sparks S.J., 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *Journal of Petrology* 29 (3), 599–624. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.599>.
- Izokh A.E., Lavrenchuk A.V., Vasyukova E.A., 2004. The dike complex of West Sangilen is a manifestation of the Ordovician mantle magmatism. In: Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent). Issue 2, Vol. 1. Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, p. 143–144 (in Russian) [Изох А.Э., Лавренчук А.В., Васюкова Е.А. Дайковый комплекс Западного Сангилена – проявление ордовикского мантийного магматизма // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 2. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2004. Т. 1. С. 143–144].
- 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>.
- Khromykh S.V., Burmakina G.N., Tsygankov A.A., Kotler P.D., Vladimirov A.G., 2017. Interactions between gabbroid and granitoid magmas during formation of the Preobrazhensky intrusion, East Kazakhstan. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (2), 311–330 (in Russian) [Хромых С.В., Бурмакина Г.Н., Цыганков А.А., Котлер П.Д., Владимиров А.Г. Взаимодействие габброидной и гранитоидной магм при формировании Преображенского интрузива, Восточный Казахстан // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 2. С. 311–330]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0243>.
- Kuzmichev A.B., 2004. Tectonic History of the Tuva-Mongolia Massif: Early Baikalian, Late Baikalian and Early Caledonian Stages. PROBEL-2000, Moscow, 191 p. (in Russian) [Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: Пробел-2000, 2004. 191 с.].
- Kuzmichev A.B., Bibikova E.V., Zhuravlev D.Z., 2001. Neoproterozoic (similar to 800 Ma) orogeny in the Tuva-Mongolia Massif (Siberia): island arc-continent collision at the northeast Rodinia margin. *Precambrian Research* 110 (1–4), 109–126. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00183-8).
- Litvinovsky B.A., Zanvilevich A.N., Kalmanovich M.A., 1995a. Repeated mixing of coexisting syenitic and basic magmas and its petrological significance, Ust-Khilok massif, Transbaikalia. *Petrologiya* 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 Хилоский массив, Забайкалье // *Петрология*. 1995. Т. 3. № 2. С. 133–157].
- Litvinovsky B.A., Zanvilevich A.N., Lyapunov S.M., Bindeman I.N., Davis A.M., Kalmanovich M.A., 1995b. Model of composite basite-granitoid dike generation (Shaluta Pluton, Transbaikalia). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology*

- and Geophysics) 36 (7), 3–22 (in Russian) [Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Ляпунов С.М., Биндеман И.Н., Дэвис А.М., Калманович М.А. Условия образования комбинированных базит-гранитных даек (Шалутинский массив, Забайкалье) // *Геология и геофизика*. 1995. Т. 36. № 7. С. 3–22].
- Litvinovsky B.A., Zanzvilevich A.N., Wickham S.M., Jahn B.M., Vapnik Y., Kanakin S.V., Karmanov N.S., 2017. Composite dikes in four successive granitoid suites from Transbaikalia, Russia: The effect of silicic and mafic magma interaction on the chemical features of granitoids. *Journal of Asian Earth Sciences* 136, 16–39. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.12.037>.
- Lowell G.R., Young G.J., 1999. Interaction between coeval mafic and felsic melts in the St. Francois Terrane of Missouri, USA. *Precambrian Research* 95 (1–2), 69–88. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00127-2).
- Marshall L.A., Sparks R.S.J., 1984. Origin of some mixed-magma and net-veined ring intrusions. *Journal of the Geological Society* 141 (1), 171–182. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.1.0171>.
- Nardi L.V.S., de Lima E.F., 2000. Hybridisation of mafic microgranular enclaves in the Lavras Granite Complex, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 13 (1–2), 67–78. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00006-7).
- Perugini D., Poli G., 2005. Viscous fingering during replenishment of felsic magma chambers by continuous inputs of mafic magmas: Field evidence and fluid-mechanics experiments. *Geology* 33 (1), 5–8. <https://doi.org/10.1130/G21075.1>.
- 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 (in Russian) [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]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0247>.
- Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., 2006. Magma mingling: tectonic and geodynamic implications. *Geotectonics* 40 (2), 120–134. <https://doi.org/10.1134/S001685210602004X>.
- Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Yakovlev V.A., Khubanov V.B., Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Buyantuev M.D., 2019. Composition and U-Pb (LA-ICP-MS) isotopic age of zircons from composite dikes of Western Sangilen (Tuva-Mongolian orogen). *Russian Geology and Geophysics* 60 (1), 45–66. <https://doi.org/10.15372/RGG2019004>.
- Vladimirov V.G., 2017. The origin and mechanisms of formation of magmatic mingling structures in combined gabbro-granite dykes. In: Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Materials of the IX All-Russia petrographic conference with international participation. Tomsk State University, Tomsk, p. 67–69 (in Russian) [Владимиров В.Г. Происхождение и механизмы формирования структур магматического минглинга в комбинированных габбро-гранитных дайках // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы IX Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: ТГУ, 2017. С. 67–69].
- Vladimirov V.G., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., 2016. Two groups of magmatic mingling (case of the early caledonides of West Sangilen, Southeastern Tuva). In: Correlation of Altaides and Uralides: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics and metallogeny. Materials of the Third 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 Сангилена, 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., Karmysheva I.V., Yakovlev V.A., Travin A.V., Tsygankov A.A., Burmakina G.N., 2017. Thermochronology of mingling dykes in West Sangilen (South-East Tuva, Russia): evidence of the collapse of the collisional system in the north-western edge of the Tuva-Mongolia massif. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (2), 283–310 (in Russian) [Владимиров В.Г., Кармышева И.В., Яковлев В.А., Травин А.В., Цыганков А.А., Бурмакина Г.Н. Термохронология минглинг-даек Западного Сангилена (Юго-Восточная Тува): свидетельства развала коллизионной системы на северо-западной окраине Тувино-Монгольского массива // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 2. С. 283–310]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-2-0242>.
- Vladimirov V.G., Vladimirov A.G., Gibsher A.S., Travin A.V., Rudnev S.N., Shemelina I.V., Barabash N.V., Savinykh Y.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.
- Wiebe R.A., 1973. Relations between coexisting basaltic and granitic magmas in a composite dike. *American Journal of Science* 273 (2), 130–151. <https://doi.org/10.2475/ajs.273.2.130>.
- Wilcox R.E., 1999. The idea of magma mixing: history of a struggle for acceptance. *The Journal of Geology* 107 (4), 421–432. <https://doi.org/10.1086/314357>.
- Windley B.F., 1965. The composite net-veined diorite intrusives of the Julianehåb district, South Greenland. *Meddelelser om Grønland* 172 (8), 1–60.
- Zanzvilevich A.N., Kalmanovich M.A., Litvinovsky B.A., Posokhov V.F., Shadaev M.G., 1991. Early Permian stage of granitoid magmatic activity in the Western Transbaikalia. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 32 (11),

27–37 (in Russian) [Занвилевич А.Н., Калманович М.А., Литвиновский Б.А., Посохов В.Ф., Шадаев М.Г. Ранне-пермский этап гранитоидного магматизма в Западном Забайкалье // Геология и геофизика. 1991. Т. 32. № 11. С. 27–37].

Zimanowski B., Büttner R., 2002. Dynamic mingling of magma and liquefied sediments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 114 (1–2), 37–44. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00281-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00281-5).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

Владимир Геннадьевич Владимиров

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 национальный исследовательский
государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

e-mail: vvg@igm.nsc.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2996-3789>

Vladimir G. Vladimirov

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher

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

Владислав Александрович Яковлев

м.н.с.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

e-mail: yakovlew.official@gmail.com

Vladislav A. Yakovlev

Junior Researcher

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

Ирина Владимировна Кармышева

канд. геол.-мин. наук, н.с.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

e-mail: iri@igm.nsc.ru

Irina V. Karmysheva

Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher

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