

УДК 551.242.11.052/552.3(470.317)

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИЧЕСКОГО СМЕШЕНИЯ МАГМ (МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА)

© 2006 г. Е. В. Скляр¹, В. С. Федоровский²

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск 664033, ул. Лермонтова, 128

²Геологический институт РАН, Москва, 119017, Пыжевский пер., 7

Поступила в редакцию 07.02.2005 г.

Предпринята попытка (авторские и опубликованные данные) тектонического и геодинамического анализа проявлений магматического минглинга – механического смешения базитовых и салических магм. Рассмотрены взаимоотношения базитов и гранитоидов в комбинированных дайках и сложно построенных плутонах. Магматический минглинг обнаруживается в трех типах обстановок: надсубдукционных, внутриплитных и коллизионных, обсуждаются признаки минглинга, характерные для каждого из них. Специально (на примере Ольхонской коллизионной системы в Сибири) рассмотрены отдельные аспекты магма-минглинга коллизионного типа, который связан с синметаморфическим сдвиговым тектогенезом и может рассматриваться как прямой индикатор синорогенического коллапса коллизионного сооружения.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы минглинга (механического смешения)¹ и миксинга (химического смешения) различных по составу магм широко распространены во многих геодинамических обстановках. Парадоксально, но факт: впервые (середина XIX века) идея о смешении различных по составу магм была выдвинута не геологами, а химиком-аналитиком Робертом Бунсеном [42]. Отобрав пробы вулканических пород в одном из районов распространения гейзеров Исландии, Р. Бунсен выявил существенные различия по химическому составу и выдвинул предположение о существовании слоя базальтовой магмы, перекрытой сверху слоем риолитовой магмы, и происхождении всего спектра составов магматических пород в результате различной степени их смешения. Неудивительно, что идея была сразу резко раскритикована геологами, которые занимались изучением Исландии, а затем возрождена, но уже с геологическим приоритетом. К концу XIX – началу XX веков в лите-

ратуре появились и другие доказательства смешения контрастных по составу магм [42], прежде всего, комбинированные, или композитные, дайки и силлы, а также гранитные плутоны с многочисленными шлирами, автолитами и включениями (enclaves) пород базитового состава. Появились также новые описания минглинга в других вулканических провинциях мира. Идея совместного внедрения и кристаллизации контрастных по составу магм стала популярной. Однако в начале XX века она была вытеснена другой концепцией – кристаллизационной дифференциации, наиболее полно отраженной в книге Н. Боуэна “Эволюция изверженных пород” [24], которая стала учебником и практическим руководством для поколений “магматических” геологов. Концепция является общепринятой, развивается и в настоящее время, и ничего страшного для минглинга в ее появлении не было бы, если бы механизм кристаллизационной дифференциации не провозглашался единственным, обеспечивающим все разнообразие магматических пород. Сторонники других представлений, пострадавших на хорошо изученных объектах, были задвинуты в тень, как это всегда бывает при появлении новых парадигм и панацей. К тому же модель смешения долгое время считалась нереальной, так как полагали, что резкое различие вязкости и температур кислых и основных магм не позволит ей реализоваться в природе. Однако в середине века изучение все новых и новых объектов с неоспоримыми свидетельствами сосуществования контрастных по составу магм привели к возрождению идеи и появлению многочисленных публикаций (обзоры

¹ В зарубежной литературе процессы механического смешения магм обозначаются термином “минглинг”, который подразумевает, что гомогенизация расплавов не была достигнута (история вопроса в [42]). В статье мы используем и тот, и другой термины – для русскоязычного читателя они идентичны. Вместе с тем, при недостаточно профессиональном переводе на английский язык громоздкого словосочетания “механическое смешение магм” существует опасность грубой ошибки. Она может возникнуть автоматически в том случае, если при переводе слова “смешение” будет употреблено слово “mixing”. “Бытовой” смысл фразы не изменится, а научное ее содержание окажется непорочно искаженным. В тексте статьи (чтобы избежать двусмысленностей) мы неоднократно применяем русскоязычный и англоязычный термины совместно.

в [12, 26, 27, 42]), количество которых продолжает стремительно нарастать.

Следует заметить, что понятие “минглинг” значительно расширилось и вышло за рамки взаимодействия только расплавов. Вначале были выделены и охарактеризованы пипериты [35], образующиеся при взаимодействии изливающихся лав с обводненными неконсолированными осадками. Позднее был введен термин “метаморфический минглинг” [18], характеризующий механическое смешение пластичных метаморфических пород и базитовых расплавов в коллизионных зонах. В настоящей статье мы не ставили задачу рассмотреть все типы минглинга, ограничиваясь лишь “классическим” магматическим типом, что и акцентировано в названии. Более того, поскольку из всего многообразия проблем, связанных с взаимодействием различных по составу магм, в абсолютном числе публикаций обсуждаются только петрологические, а работы, в которых рассмотрение выходит за границы конкретных магматических тел (даек, силлов, потоков, плутонов), ограничено единицами, было бы целесообразно сосредоточиться только на тектонических и геодинамических аспектах процессов минглинга. В предлагаемой статье мы опираемся в основном на наблюдения, проведенные нами и другими исследователями в пределах единого региона, включающего Западное Прибайкалье и Забайкалье.

ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИЗНАКИ МЕХАНИЧЕСКОГО СМЕШЕНИЯ МАГМ (МАГМАТИЧЕСКОГО МИНГЛИНГА)

С тектонической точки зрения важнейшим признаком минглинга является то, что происходит механическое смешение мантийных (базитовых) и предположительно коровых (кислых) магм, которые выплавлялись на разных уровнях коры и мантии, однако финальная точка их “жидкого” сосуществования происходила в средних и верхних частях коры или на поверхности. Описаны и случаи минглинга (механического смешения) расплавов разного состава, образовавшихся в результате кристаллизационной дифференциации в одной магматической камере, однако они незначительны по масштабам и не имеют широкого распространения.

Общераспространенной является точка зрения об образовании значительных объемов гранитоидов в нижней части коры в результате внедрения мантийных расплавов базитового состава. Этот вывод опирается на тесную пространственную ассоциацию базитов и гранитов. Одной из наиболее наглядных является качественная модель Х. Хупперта и С. Спаркса [30], показывающая стадийность внедрения в кору базитовых расплавов и выплавления гранитных магм (рис. 1). На

начальной стадии рифтогенеза в условиях холодной и хрупкой коры (см. рис. 1, а) базальты изливаются на поверхность и в то же время формируют силлы и относительно небольшие камеры в верхних и средних частях коры. Кондуктивный разогрев коры со временем приводит к выплавлению гранитоидных магм (см. рис. 1, б), очаги которых являются естественными “ловушками”, не пропускающими на более высокий уровень новые порции базальтового расплава, что, в свою очередь, приводит к еще большему разогреву коры. При этом отдельные порции гранитной магмы могут изливаться на поверхность. В условиях существенного прогрева коры (см. рис. 1, в) могут формироваться крупные плутоны, а в поверхностных условиях происходит крупномасштабное излияние игнимбритов. Базальты на поздних стадиях могут изливаться только в периферийных частях магматической провинции.

В сложно построенных крупных плутонах породы основного и кислого состава встречаются в виде комплексов субсинхронных даек, в том числе кольцевых, малых интрузий, шлиров и автолитов (диалитов, по В.С. Попову [12]) в гранитах [25, 26, 34] или сиенитах [10]. Среди вулканических полей кислого состава проявления базальтового вулканизма сосредоточены в виде мелких отдельных лавовых потоков, шлаковых конусов, а также включений и “прослоев” базитов в кислых породах [21, 32]. Отдельного упоминания заслуживают комбинированные дайки и силлы, которые могут быть близповерхностными подводящими каналами вулканических построек [36, 37, 39], отдельными фазами сложно построенных интрузий [8–11, 25, 26, 43], а также компонентом высокотемпературных метаморфических коллизионных комплексов [6, 14, 22].

Таким образом, в текстурно-морфологическом отношении можно выделить три основных варианта проявления процессов минглинга: лавовые потоки, комбинированные дайки и магматические камеры.

Главными признаками магматического минглинга в лавовых потоках являются мафические включения и шлиры основных пород, а также ксенокристы темноцветных минералов, богатых кальцием плагиоклазов (в кислых лавах), кварца и щелочного полевого шпата (в лавах среднего и основного состава). В большинстве описанных в литературе случаев эффузивные породы не обнаруживают никаких следов наложенных деформаций.

Комбинированные дайки имеют разнообразную морфологию: прямолинейные, изогнутые, ветвящиеся, кольцевые. По характеру взаимоотношений разных по составу магм выделяется два основных типа: комбинированные дайки, в которых центральные части сложены кислыми породами, а краевые – базитами, и дайки с кислыми

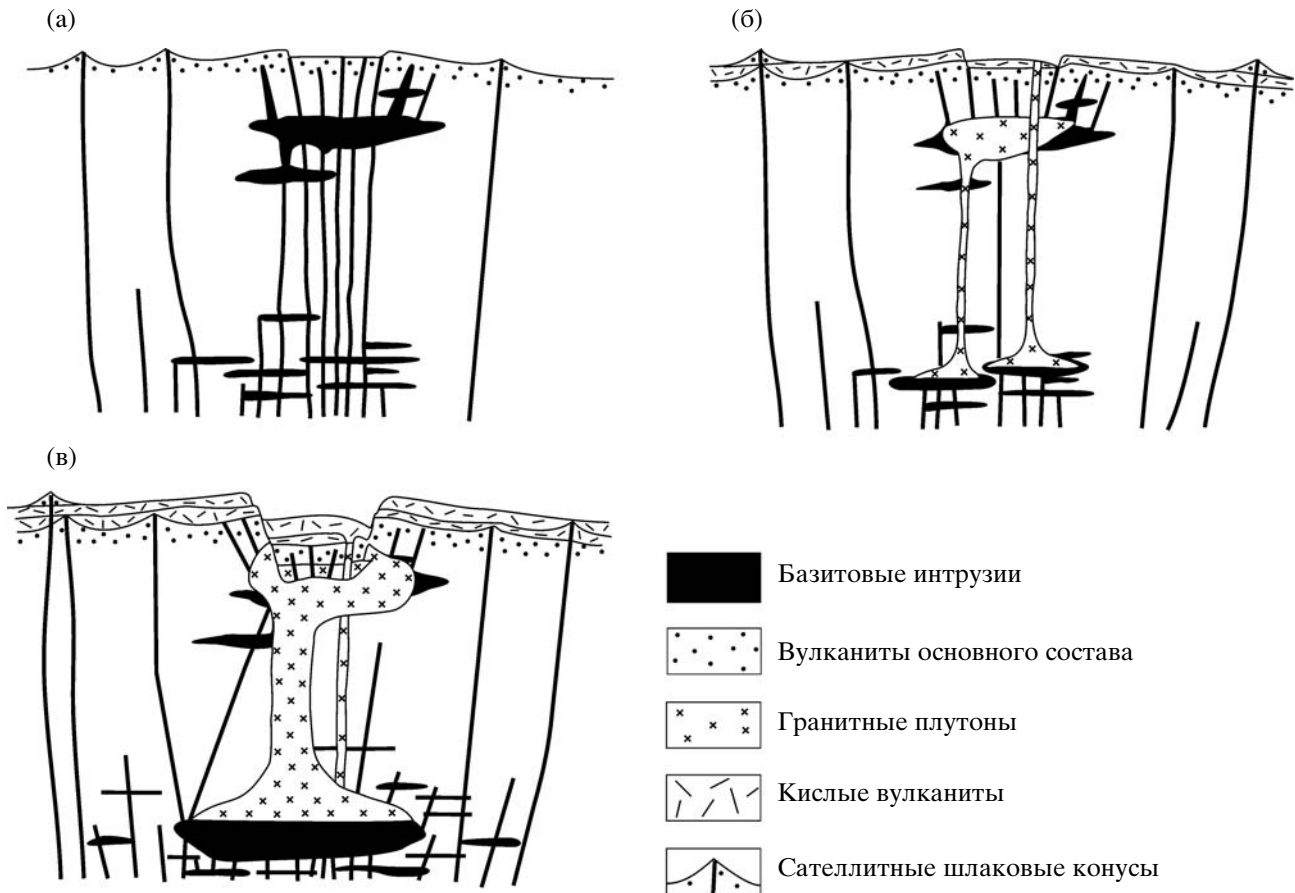


Рис. 1. Схема эволюции гранитоидной магматической системы при внедрении в кору основных магм, по [30]

а – ранняя стадия внедрения базальтов в холодную кору, когда они могут изливаться на поверхность; б – стадия прогрева коры и начала выплавления кислых коровых магм. Последние изливаются на поверхность или кристаллизуются в приповерхностных условиях; в – стадия массового плавления коры, характеризующаяся игнимбритовыми извержениями, коллапсом кальдер и формированием крупных гранитных плутонов. Базальты могут проникать в верхние горизонты коры только в периферийных частях магматической провинции

породами в краевых частях [41]. Первый тип даек (рис. 2), описанный еще классиком магматической геологии А. Харкером [28], образуется при последовательных инъекциях обычно сначала основной, а затем кислой магмы; последняя внедрялась в центральную, не до конца консолидированную зону только что образованной основной дайки. Вторым, резко преобладающим, типом даек образуется при одновременном внедрении двух контрастных магм и характеризуется значительно большим разнообразием соотношений базитового и гранитного материала. Здесь обычны подушечные и брекчиевидные текстуры, однако встречаются и псевдослоистые разновидности. Нередки дайки с абсолютным преобладанием базитов, которые пронизаны многочисленными прожилками кислого состава (*net-veined complexes*). Особенности даек второго типа будут показаны ниже, на примерах гранитоидных массивов Забайкалья и метаморфического комплекса Ольхонского региона. Степень син- и посткристалли-

зационных деформаций комбинированных даек может варьировать весьма существенно. Прослеживается весь спектр от даек, в которых структурно-текстурные изменения базитов и гранитов не проявлены, через различия с той или иной степенью тектонизации базитов и гранитов до тел, в которых и базиты, и граниты превращены в метаморфические породы.

В магматических камерах проявления механического смешения (*минглинга*) наиболее разнообразны и определяются многими причинами, важнейшей из которых является степень кристаллизации гранитоидной магмы. Два крайних варианта соответствуют: а) жидкому состоянию гранитоидной магмы с разным количеством кристаллов; б) твердому закристаллизованному субстрату, иногда с незначительным количеством остаточного расплава. Рассмотрим более подробно свойства *минглинга* для этих двух вариантов.

Важнейшие признаки внедрения базитового расплава в магму кислого состава (первый вари-

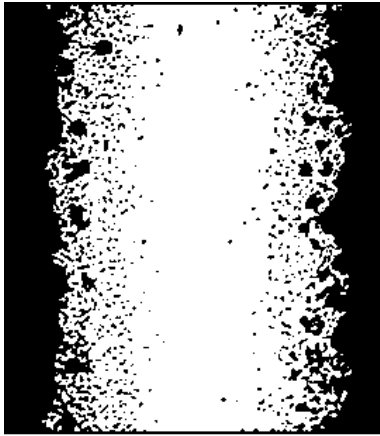


Рис. 2. Разрез комбинированной дайки с базитами в краевых частях, по [28]

ант) в достаточно полном виде сформулированы Б.А. Литвиновским с соавторами [10]:

1. В крупных телах и даже крупных нодулях ус-танавливается отчетливое уменьшение размеров зерен породообразующих базитов на контакте с вмещающей салической породой, что может свидетельствовать о быстром застывании базальтовой магмы у границы с кислым расплавом, температура которого была ниже температуры солидуса базальтов.

2. Базиты повсеместно характеризуются мелкозернистым, очень редко средне-мелкозернистым сложением, в том числе в телах размером 20–30 м в поперечнике. Такие особенности также могут свидетельствовать о быстром застывании базитового расплава.

3. Во вмещающих гранитоидах уменьшение размеров зерен не отмечается ни в контакте с базитовыми телами, даже крупными, ни в тонких инъекциях в базиты. В то же время у границ с ксенолитами метаморфических пород кровли зонки закалки в сиенитах отмечаются постоянно.

4. Форма поверхности нодулей в поперечном срезе тонковолокнистая, фестончатая, лопастевидная; это указывает на наличие большого количества мелких глобулей и характерно для пограничных поверхностей двух жидкостей с разной вязкостью [27].

5. Крупные базитовые тела постоянно окружены ореолом округлых и овальных нодулей, а при удлиненной форме имеют еще и шлейф из нодулей. Такие шлейфы и ореолы – еще одно свидетельство диспергирования более вязкой жидкости в менее вязкой.

6. На некоторых участках включения имеют вид изогнутых полосок и лент, при этом петрографическое изучение не обнаруживает признаков деформаций, катаклаза и трансляции породообразующих минералов базитов. Вмещающие сиениты

также сохраняют нормальные магматические структуры. Это позволяет говорить о пластической деформации базитов в кислой магме.

7. Особенно отчетливо пластическая деформация и ориентировка базитовых включений проявлены на участках, где гранитоидный расплав перемещался вдоль контакта с твердым габбро и внедрялся в него по трещинам. Базитовые включения здесь имеют вид удлиненных, нередко изогнутых линз, ориентированных вдоль контакта с блоками-ксенолитами габбро, а в шлифах обнаруживается отчетливая ориентировка призматических зерен плагиоклаза и темноцветных минералов как в базитах, так и (в меньшей степени) во вмещающих гранитоидах.

8. Важным свидетельством сосуществования и химического взаимодействия двух контрастных магм являются реакционные тоналитовые и сопряженные с ними биотит-плагиоклазовые оторочки, нередко фиксируемые в контакте гранитоидов с базитовыми включениями. Как показано в [38], наличие таких оторочек свидетельствует, во-первых, о диффузионном обмене между двумя магмами, а во-вторых, о дополнительном разогреве сиенитового расплава в контакте с базитами.

Хотя перечисленные признаки были определены только для Романовского массива Забайкалья, они могут рассматриваться как наиболее характерные структурно-петрографические свидетельства минглинга (механического смешения) основных и кислых магм в целом.

Важнейшим показателем внедрения базитовых даек в той или иной степени консолидированные граниты, содержащие <30% остаточного расплава (второй вариант), являются вытянутые рои или цепочки меланократовых включений, синплутонические дайки, представленные линейными цепочками шарообразных или каплевидных тел базитов (рис. 3). При этом базиты не несут следов будинажа, а их морфология определяется особенностями кристаллизации. В пользу значительной степени раскристаллизованности гранитоидов на момент внедрения магмы основного состава свидетельствует возможность проявления их хрупкой деформации (возникновение линейных трещин, заполнявшихся магмой основного состава). Кислая магма, содержащая 35–70% кристаллов, имеет реологические свойства жидкости Бингема [31], в которой при деформации могут развиваться линейные зоны сдвига. Вдоль таких зон обычно и происходят инъекции базитовых расплавов. В зависимости от количества кристаллов на том или ином участке могут возникать все разновидности – от роев и цепочек включений до линейных синплутонических даек (как синплутонические они определяются по присутствию инъекций остаточного расплава из вмещающих гранитоидов). Нельзя исключать и влияние до-

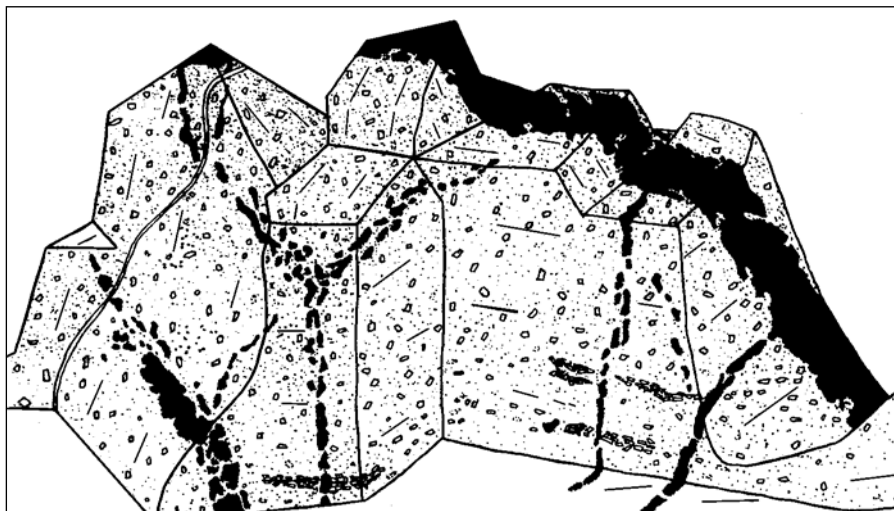


Рис. 3. Система синплутонических долеритовых даек, по [8]

Маломощные дайки представляют собой цепочки шарообразных, овальных, удлинённых фрагментов, нередко с признаками пластической деформации

полнительного разогрева боковых пород, который мог приводить к их плавлению в контактовой зоне.

потому, что такое описание было бы повторением разделов о комбинированных дайках и лавовых потоках.

ПРОЦЕССЫ МИНГЛИНГА (МЕХАНИЧЕСКОГО СМЕШЕНИЯ МАГМ) В РАЗНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ

Пространственно-генетический парагенезис кислых и базитовых магм характерен для надсубдукционных орогенных поясов, специфических областей внутриконтинентального растяжения (например, Провинция Бассейнов и Хребтов), внутриконтинентальных и океанических провинций внутриплитного магматизма, а также для коллизионных зон. Рассмотрим проявления процессов магматического минглинга в разных геодинамических обстановках. При этом в силу многих общих черт магматизма и тектоники целесообразно объединить некоторые из них. В частности, в надсубдукционные обстановки объединяются островодужные системы и активные континентальные окраины калифорнийского и андийского типов, а во внутриплитные – рифтовые системы и мантийные плюмы. Авторы отдают себе отчет в том, что полное обобщение характерных особенностей минглинга в разных обстановках вряд ли возможно на современном уровне знаний, прежде всего из-за недостаточности данных в публикациях. Именно поэтому мы приводим наиболее характерные и профессионально рассмотренные примеры. Более того, мы сознательно опускаем явления минглинга в приповерхностных условиях (лавовые потоки, подводные дайки), ограничиваясь более глубинными уровнями, прежде всего

Надсубдукционные обстановки

Процессы минглинга (механического смешения магм) чрезвычайно разнообразно проявлены в пределах зрелых островных дуг и континентальных магматических окраин. Наиболее детально они описаны на западной окраине Северной Америки, где магматические события датируются поздним мелом–кайнозойем. Одним из наиболее геологически изученных примеров магматического минглинга является мигматитовый комплекс Чилан [29]. Он сложен мигматизированными метатоналитами позднемелового возраста. Амфиболиты, горнблендиты, метагаббро и метадiorиты пользуются меньшим распространением, однако являются важной составной частью комплекса. В значительном количестве встречаются в различной степени деформированные дайки основного состава. Принципиальная схема взаимоотношений различных типов магматических пород показана на рис. 4.

Выделяется пять фаз базит-ультрабазитового магматизма [29]: 1 – ранние метагабброиды, тектонизированные и преобразованные в агматиты; 2 – мигматизированные базиты, которые вместе с ассоциирующим материалом лейкосомы “обтекают” агматитовые блоки первой фазы (2), слагают мощные “слои” (2М) или мелкие согласные будинированные дайки (2S); 3 – ранние синплутонические дайки и более крупные тела, которые прорывают агматиты и мигматизированные дай-

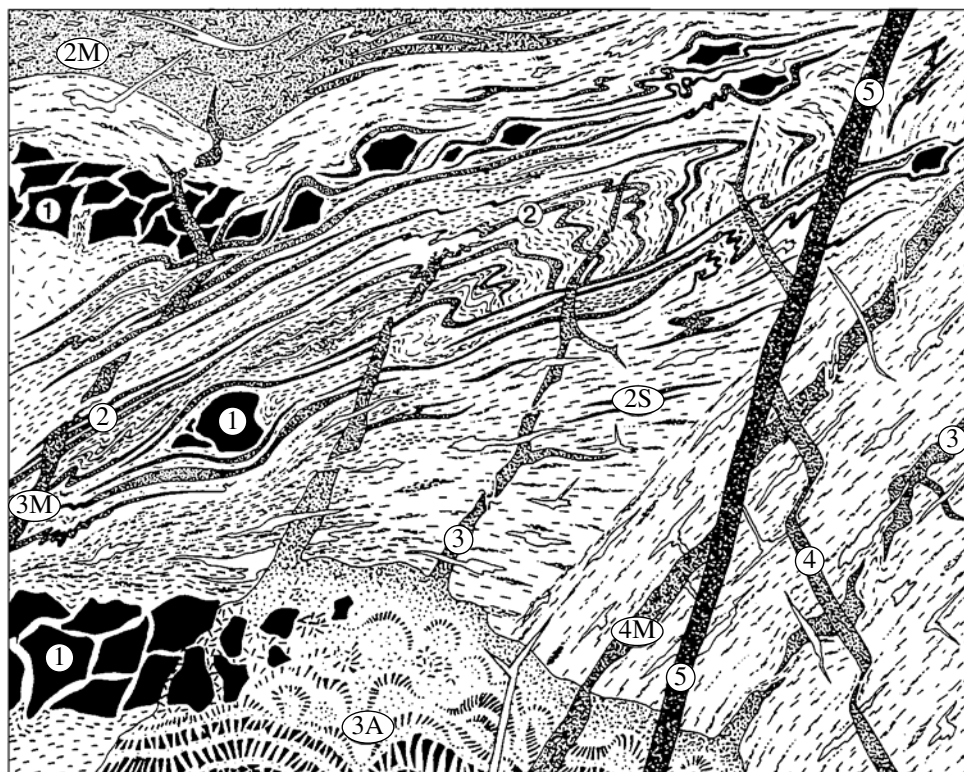


Рис. 4. Принципиальная схема, показывающая характер взаимоотношений разных фаз внедрения и особенности структуры мигматитового комплекса Чилан, по [29]

Цифрами обозначены пять типов основных и ультраосновных пород. Описание в тексте

ки и деформируются в процессе вязко-пластичных деформаций вмещающих гранитоидных пород; 4 – поздние синплутонические дайки, которые в незначительной степени подвергались поздним деформациям; 5 – постплутонические дайки лампрофиров с характерными зонами закалки.

Доанатектические базитовые интрузии внедрялись в форме отдельных небольших тел в консолидированные тоналиты. В некоторых телах процессы кристаллизационной дифференциации приводили к формированию кумулятов основного и ультраосновного состава, а также диоритовых дифференциатов в небольших камерах. Для этого этапа не наблюдается признаков минглинга или гибридации основной магмы. Позднее базиты подвергались хрупким деформациям и местами содержат секущие жилы гранитного состава. Максимальная протяженность ранних метабазитов составляет 13 км. Поздние хрупкие деформации и вращение отдельных блоков привели к формированию на некоторых участках типичных агматитовых текстур.

Синанатектические магматические интрузии характеризуются флюидальными структурными формами, что резко отличает их от базитов первой фазы. Структурно-текстурные признаки поз-

воляют считать, что вмещающие кислые породы в момент внедрения базитовой магмы находились в пластичном, частично расплавленном состоянии, что обусловило “переслаивание” (минглинг) лейкократовых пород с базитовыми инъекциями и гнейсовидность как вмещающих пород, так и кристаллизовавшихся порций основной магмы и сегрегированных новообразованных кислых выплавков.

Ранние синплутонические базитовые дайки широко распространены среди метатоналитов и среди мигматитов. Они дискордантны по отношению к мигматитовой полосчатости, но в то же время испытали достаточно интенсивные деформации на поздних стадиях и после кристаллизации. Незначительные по объему выплавки кислого состава, обусловленные внедрением базитовой магмы, проявлены в виде маломощных прожилков неправильной формы в базитах.

Позднеплутонические дайки по своему составу и структурно-текстурным признакам во многом сходны с раннеплутоническими. Их отличает меньшая степень посткристаллизационных деформаций и то, что они секут жилы кислых выплавков, связанных с предыдущим импульсом базитового магматизма. Интересно то, что как ран-

не-, так и позднеплутонические дайки достаточно широко распространены в пределах площадей развития метатоналитов и мигматитов комплекса Чилан и крайне редко встречаются в породах рамы, вмещающей этот комплекс.

Самые поздние дайки лампрофиров пересекают весь комплекс перечисленных магматических пород и не обнаруживают следов взаимодействия с кислыми расплавами.

Весь комплекс Чилан можно рассматривать в качестве примера “мегаинглинга”, со сложными взаимоотношениями в пространстве и времени различных по составу магм. Важным моментом, на который следует обратить внимание, является высокая степень син-, поздне- и посткристаллизационных деформаций при внедрении базитов 2–4 фаз.

Внутриплитные обстановки

Явления механического смешения магм (минглинга) такого типа наиболее детально описаны в гранитоидных массивах Монголо-Забайкальской щелочно-гранитно-сиенитовой провинции (по [3] позднепалеозойско-раннемезозойского возраста), а также в гранитоидах, предшествующих формированию этой провинции. Внутриплитная геодинамическая природа массивов аргументирована в работе В.В. Ярмолюка и соавторов [19].

Процессы смешения салических и мафических магм были проявлены на разных этапах формирования Романовского [8, 10], Усть-Хилокского [9, 15], Харитоновского [43] и Шалутинского [11] массивов. Они выражены чрезвычайно разнообразно и охватывают весь спектр признаков минглинга, обобщенных Б.А. Литвиновским с соавторами [10]. Широко проявлены меланократовые включения в монцонитах, сиенитах и гранитах, слагающих массивы, а также рои синплутонических даек и разные по составу комбинированные дайки. На рис. 5 показаны наиболее характерные признаки смешения в упомянутых выше массивах. В целом же можно отметить, что становление и эволюция позднепалеозойских гранитоидных и сиенитовых массивов характеризовалась неоднократным поступлением в магматические камеры магм основного состава, в разной степени контаминированных кислым материалом. В изученных случаях глубина формирования массивов оценивается в 6–7 км [15]. Говоря о глубинах формирования массивов, следует иметь в виду то, что речь идет только об уровне, на котором наиболее отчетливо и рельефно проявлен минглинг. Однако процессы магмогенерации происходили практически на всем отрезке от верхней мантии (базитовые расплавы) до верхней коры. Разнообразие магм, их выплавление и эволюция в промежуточных очагах на разных глубинах корректно обоснованы для Усть-Хилокского массива, в форми-

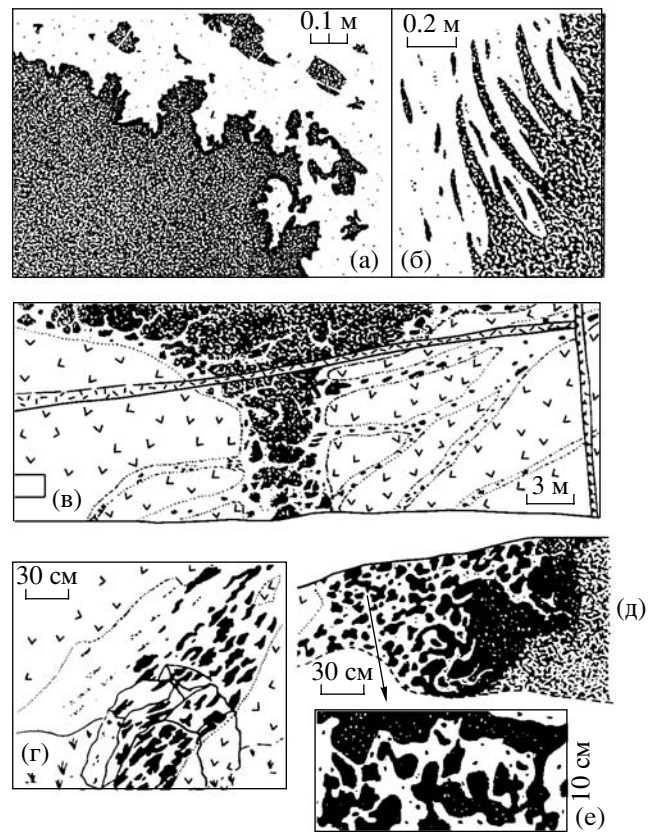


Рис. 5. Характерные признаки минглинга в гранитоидных массивах Забайкалья, по [9, 10]

а – фестончатые и тонковолнистые ограничения базитов и краевая зона закалки на границе с аплитом в комбинированной дайке; б – пламеподобные ограничения крупного синплутонического базитового включения в монцосиенитах; в – комбинированная дайка, представляющая собой подводящий канал крупного комбинированного силла в сиенитах, и детали строения апофизы этой дайки (г); характер контакта (д) и его детали (е) крупного базитового тела в сиенитах. а, б – Усть-Хилокский массив, в–е – Шалутинский массив

ровании которого выделяются три последовательных ритма (два сиенитовых и последний – гранитный) [9]. Процессы минглинга связаны со всеми фазами внедрения, причем последний этап базальтоидных инъекций соответствует моменту полной консолидации плутона. На примере крупного Усть-Хилокского массива выделяется не менее шести этапов внедрения основных магм [11], представленных: 1) блоками-ксенолитами габбро в монцосиенитах первой фазы; 2) мезократовыми монцосиенитами с многочисленными меланократовыми включениями и крупными включениями микрогаббро в монцосиенитах; 3) синплутоническими дайками микрогаббро в монцосиенитах; 4) лейкократовыми сиенитами второй фазы с редкими мафическими включениями; 5) сиенит-

базитовыми комбинированными дайками; 6) монцонит-базитовыми комбинированными дайками; 7) аплит-базитовыми комбинированными дайками. Характер взаимоотношений базитов с салическими породами показан на рис. 5, а, б. Детальные геологические и петрологические исследования [9] позволили обосновать тезис о том, что все разнообразие магматических пород, слагающих плутон (базиты, монцониты, монцосиениты, сиениты, кварцевые сиениты, аплиты) обусловлено взаимодействием базитовой и сиенитовых магм, а также процессами кристаллизационной дифференциации в промежуточных камерах магм, образовавшихся в ходе смешения. Выплавление сиенитов и их взаимодействие с базитовыми расплавами происходили в нижних частях коры. Промежуточные очаги, обусловившие широкий спектр салических расплавов, могли располагаться на разных уровнях нижней и средней коры. И, наконец, собственно формирование плутона происходило в верхней части коры. Другими словами, процессы взаимодействия кислых и основных магм, обусловившие разные формы минглинга (механического смещения магм) и миксинга (химического смешения магм), охватывали весь разрез земной коры.

Очень важной особенностью минглинга в пределах Монголо-Забайкальской провинции является практически полное отсутствие син-, поздней и посткристаллизационных деформаций. Точнее, деформации отмечаются [9], но только связанные с латеральным флюидальным течением салических магм.

Коллизионные обстановки

В отличие от внутриплитных и надсубдукционных обстановок, явления минглинга в коллизионных комплексах практически не описаны. Статья А. Бертельсена [22], посвященная специфическим формам проявления базитов среди метаморфических пород, названных им глобулитами, вряд ли исчерпывает проблему. Минглинг-дайки (т.е. комбинированные дайки второго типа) описаны также в раннепалеозойском коллизионном комплексе Сангилене [4], однако распространение этих даек ограничивается только гранитным плутоном, и только из работ, рассматривающих соотношение магматических, метаморфических и тектонических процессов [5], позволяют связывать внедрение минглинг-даек с поздними стадиями коллизионного процесса. В этом плане в качестве тектонотипа процессов магматического минглинга в коллизионных системах на средне- и нижнекоровом уровне может быть предложена Ольхонская коллизионная система Западного Прибайкалья.

Раннепалеозойская Ольхонская коллизионная система Западного Прибайкалья представлена

сложным комплексом разнообразных магматических и метаморфических пород [17]. Для нее обосновано несколько этапов тектогенеза (покровный, купольный, сдвиговый), сопровождающихся высокотемпературными метаморфическими преобразованиями пород и разнообразным, главным образом гранитоидным, магматизмом [16, 17]. Детально охарактеризованные в многочисленных публикациях структурно-вещественные парагенезисы были сформированы в раннем палеозое в результате двух этапов коллизии (микроконтинент–островная дуга и микроконтинент–континент) [1, 13]. В результате работ последних лет [6, 14] здесь были выявлены магматические минглинг-структуры, представленные, главным образом, комбинированными дайками, которые наряду со многими общими чертами характеризуются существенными различиями. Мы разделяем их на два типа.

Первый тип представлен в Приольхонье редкими дайками, сложенными гранитами и в различной степени метаморфизованными низкокальциевыми умереннотитанистыми толеитами [14]. По степени преобразования даек можно выстроить полную последовательность от свежих субвулканических до амфиболитов (метаморфизованные субсогласные дайки). Причем совмещение “свежих” и метаморфизованных долеритов можно наблюдать в одном обнажении в районе купола Овал (рис. 6). Интрузивное тело здесь не имеет линейной дайковой формы, а представляет собой деформированную в процессе сдвиговых деформаций структуру. Диабазы располагаются среди мигматизированных гнейсов и образуют цепочки будинообразных и шарообразных тел, максимальная протяженность которых достигает 10 м. При этом “будины” заключены в “рубашку” пегматоидных гранитов мощностью от 30 см до 1 м. Как уже отмечалось выше, и базиты, и пегматоидные граниты полностью лишены следов пластических деформаций как на макро-, так и на микроуровне. К северо-западу от комбинированной дайки расположен “горизонт” среднезернистых амфиболитов, форма которого также свидетельствует об их вовлечении в процесс сдвиговых деформаций. При этом по химическому составу диабазы и амфиболиты абсолютно идентичны, соответствуя низкокальциевым умереннотитанистым толеитам [14]. Можно предполагать, что распространение синметаморфических базитовых даек в Приольхонье сильно недооценено, поскольку в случае полного метаморфического преобразования синметаморфические базитовые дайки невозможно отличить от амфиболитов в составе гранито-гнейсового комплекса.

Самые поздние комбинированные дайки являются кососекущими по отношению к метаморфическим породам и не обнаруживают признаков более поздних деформаций. Наиболее показате-

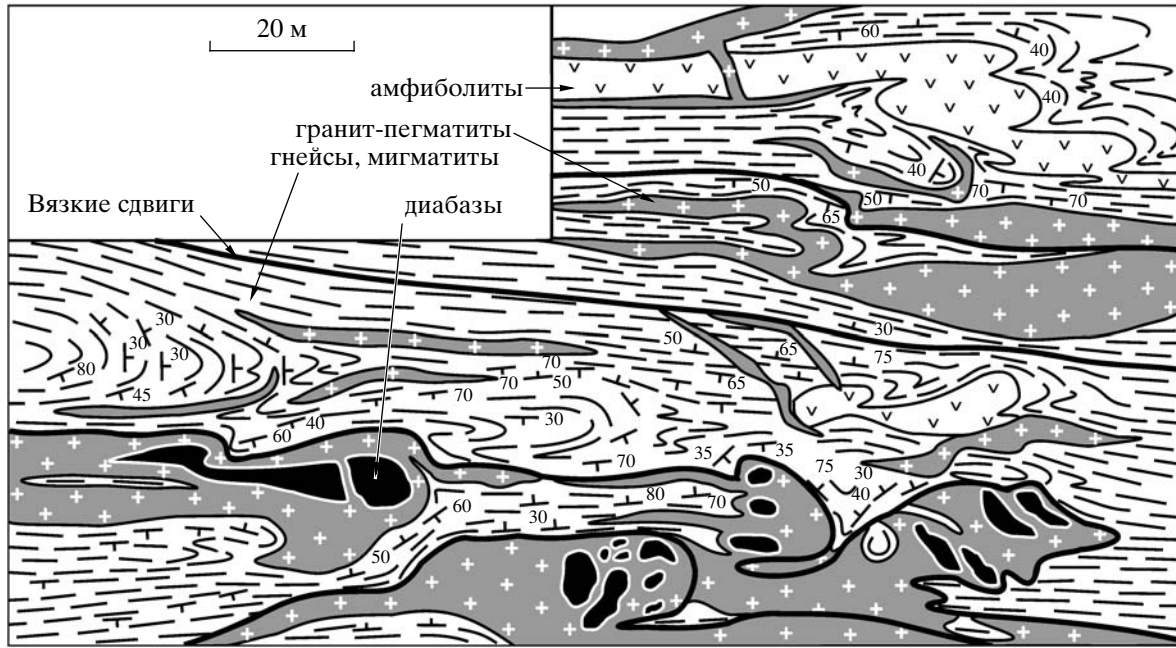


Рис. 6. Геологический план комбинированной дайки в районе купола Овал по [14]

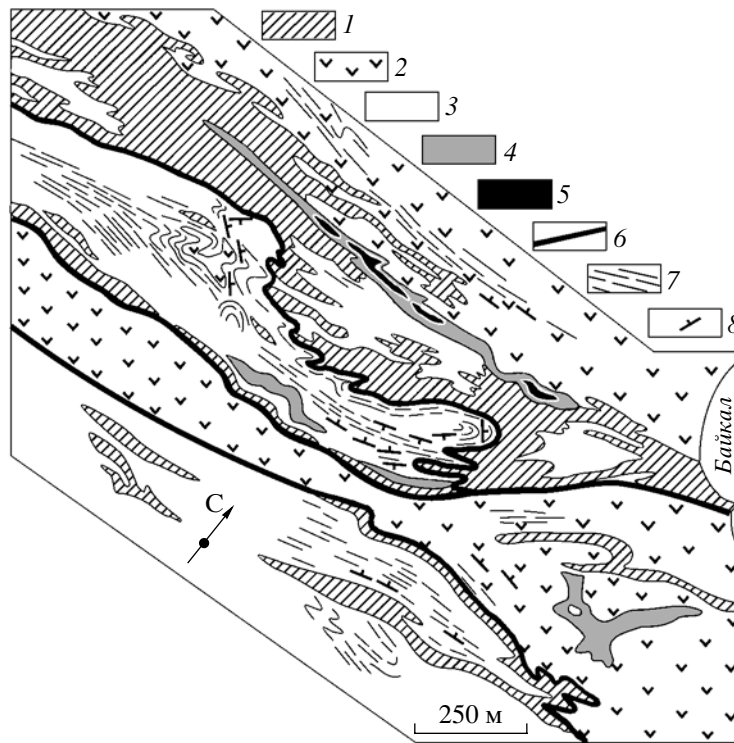


Рис. 7. Геологическая карта района п-ова Крест

1 – мраморы; 2 – амфиболиты; 3 – гнейсы, мигматиты, гранито-гнейсы; 4 – граниты симметаморфические; 5 – диабазы симметаморфические; 6 – симметаморфические слвиговые швы (бластомилониты); 7 – структурные линии в гнейсах, амфиболитах; 8 – ориентировка гнейсовидности, сланцеватости

тельной в этом плане является дайка, расположенная вблизи п-ва Крест в проливе Ольхонские Ворота, где она прослежена на расстояние более

километра (рис. 7). Дайка имеет мощность от 2–3 до 10 м в раздувах. Основной объем дайки сложен среднезернистыми биотитовыми гранитами, сре-

ди которых находятся линзы диабазов. Отрезки, сложенные только гранитами, достигают 300–350 м. Диабазы не имеют прямого контакта с вмещающими гранито-гнейсами, перемежающимися с амфиболитами и амфиболовыми гнейсами, и во всех случаях “бронированы” пегматоидными гранитами, мощность которых составляет 0,5–3 м. В диабазах полностью отсутствуют следы текстурной переработки. Иногда в краевой части диабазовых тел наблюдается уменьшение зернистости, свидетельствующее о закалочном эффекте.

Таким образом, по степени метаморфических преобразований отчетливо выстраивается ряд: секущие недеформированные дайки–деформированные субогласные дайки, в которых базиты не обнаруживают текстурных преобразований–полностью метаморфизованные дайки (амфиболиты). Близость состава и единая геохимическая специфика базитов в комбинированных дайках свидетельствует в пользу одного эпизода внедрения мантийных магм толеитового состава на поздних стадиях структурно-метаморфических преобразований коллизионного комплекса.

Второй тип комбинированных даек распространен в северной части о-ва Ольхон [6]. Здесь закартирована метаморфическая толща, представленная сложным тектонизированным переслаиванием кристаллических сланцев и мраморов с резко подчиненным количеством гнейсов, прованная многочисленными комбинированными и гранитными дайками. Комбинированные дайки распространены на отрезке около 7 км. Севернее и южнее встречаются дайки только гранитного состава. Последние обычно пологопадающие или субгоризонтальные. Для них характерно секущее положение относительно гнейсовидности вмещающих толщ. Комбинированные дайки, напротив, являются конформными по отношению к метаморфическим структурам. В некоторых случаях отмечаются лестничные дайки. Граниты слагают узкие зоны в контактовых частях даек и мало-мощные прожилки неправильной формы в центральных частях даек. Нередко наблюдается подушечная текстура базитов на контакте с гранитами (рис. 8, а). Объемное соотношение базитов и гранитов в разных телах изменяется от 30 : 1 (см. рис. 8, б) до 1 : 1 (см. рис. 8, в). Фрагменты базитов в гранитном матриксе в большинстве случаев имеют удлиненную форму и огнейсованы (см. рис. 8, в), однако встречаются и угловатые, неправильной формы обломки (рис. 8, г). Во всех изученных примерах геологические соотношения указывают на более позднее застывание гранитов, что и следовало ожидать из различия в температурах кристаллизации базитового и гранитного расплавов. Степень метаморфической переработки гранитов и базитов в дайках существенно варьирует. Наряду с массивными гранитами практически без следов поздних деформаций нередко

наблюдаются все переходы к типичным метаморфическим гнейсам без реликтов первично-магматических структур и текстур. При этом в секущих дайках направление гнейсовидности конформно простиранию даек. Базиты, темноцветные минералы которых представлены клинопироксеном, амфиболом и биотитом, часто характеризуются массивной текстурой, однако не редки и полосчатые разновидности, макроскопически и микроскопически не отличимые от кристаллических сланцев вмещающей дайки рамы.

Можно построить практически полную последовательность от даек, в которых ни базиты, ни граниты не претерпели пластических деформаций (см. рис. 8, г), до тел, в которых оба типа магматических пород превращены в метаморфические породы (см. рис. 8, в). Промежуточные варианты в основном представлены комбинированными дайками, базиты в которых имеют массивную или слабо гнейсовидную текстуру, а кислые породы краевых частей даек представлены гранито-гнейсами и гнейсами. Важнейшим признаком, позволяющим связывать внедрение комбинированных даек с заключительными стадиями коллизионного тектогенеза, является вовлечение даек в процессы складкообразования (рис. 9). Форма и положение даек свидетельствуют об их синскладчатом характере.

Наряду с комбинированными дайками встречаются более мощные тела (до 300–400 м) штокообразной формы, сложенные контрастной магматической смесью, – угловатые или будинообразные тела базитов в гранитном матриксе (рис. 10). Доля гранитов не превышает 30% общего объема. Эти тела представляют собой магматические камеры, образованные при одновременном внедрении кислых и основных магм.

Базиты в комбинированных дайках и штоках второй группы отвечают по химическому составу низкомагнезиальным щелочным базальтам [6], типичным для внутриплитных обстановок.

Таким образом, в пределах Ольхонского террейна отчетливо выделяются два типа мантийного базитового магматизма, сопровождающегося процессами минглинга с коровыми выплавками: толеитовый и щелочной. Пространственно их проявления не совмещаются, хотя и расположены на относительно небольшом расстоянии один от другого. Вопрос об их возрастных соотношениях пока не ясен. На основании опубликованных данных по возрасту метаморфических событий и гранитоидного базитового магматизма [1, 2, 7] и неопубликованных авторских данных, можно предполагать два эпизода синхронного проявления базитового и гранитоидного магматизма и высокотемпературного метаморфизма: ~500 млн. лет и 470–480 млн. лет. Если это действительно так, то предполагаемые события хорошо уклады-

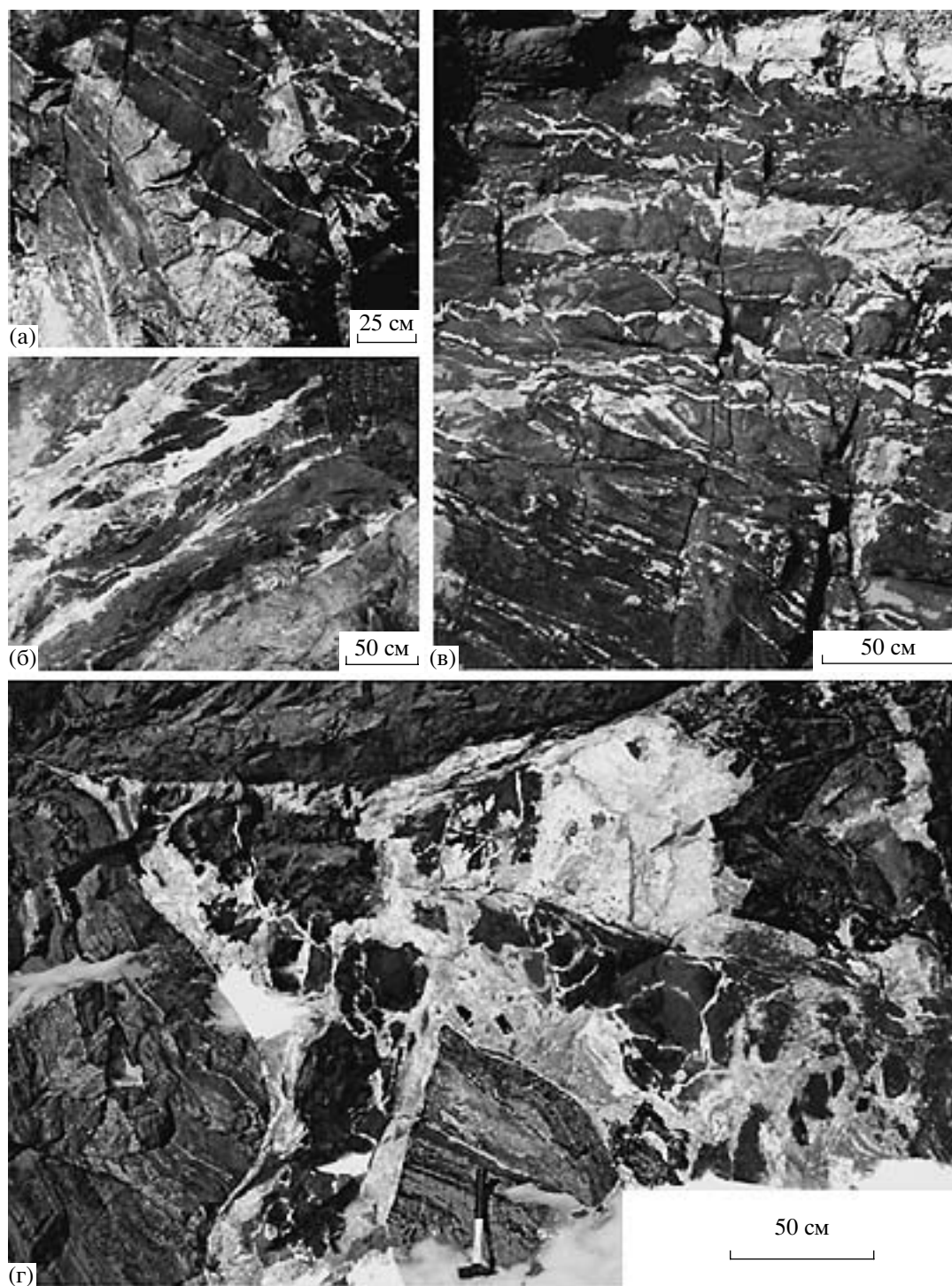


Рис. 8. Детали взаимоотношений базитов и гранитов в комбинированных дайках о-ва Ольхон (Западное Прибайкалье) а – подушечная структура базитов на контакте с гранитами; б – комбинированная дайка с гранитами на контакте и с высокой долей базитов (net-veined complexes); в – интенсивно деформированная комбинированная дайка; г – недеформированная комбинированная дайка

ваются в схему тектонической эволюции Ольхонского террейна [13, 17], предполагающую коллизии микроконтинента с островной дугой и последующую коллизии амальгамированного террейна

с Сибирским кратоном. Более того, такая схема предложена не только для Ольхонского террейна, но и для всех каледонид Центрально-Азиатского складчатого пояса [20]. По представлениям

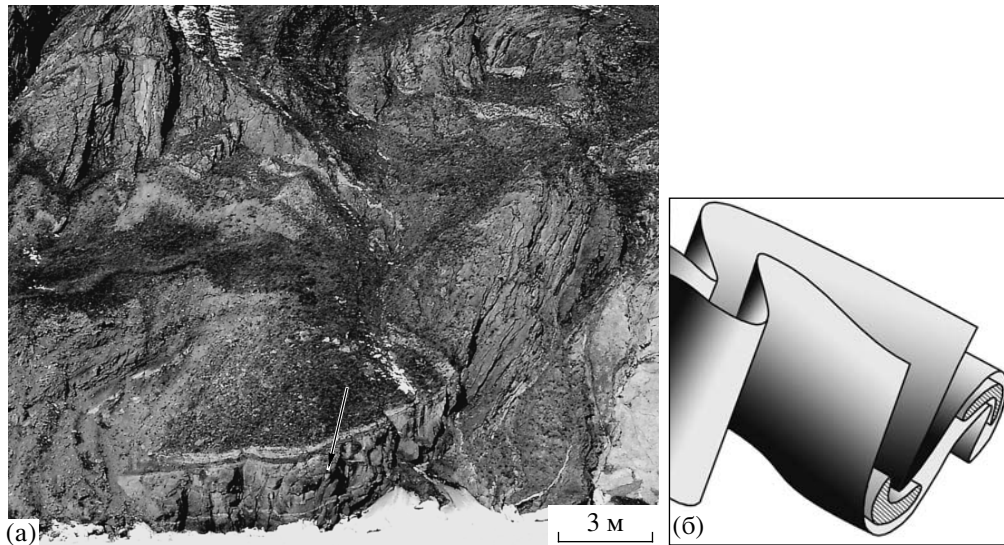


Рис. 9. Фотоснимок (а) и схема положения в складчатой структуре (б) самой мощной комбинированной дайки о-ва Ольхон (Западное Прибайкалье)

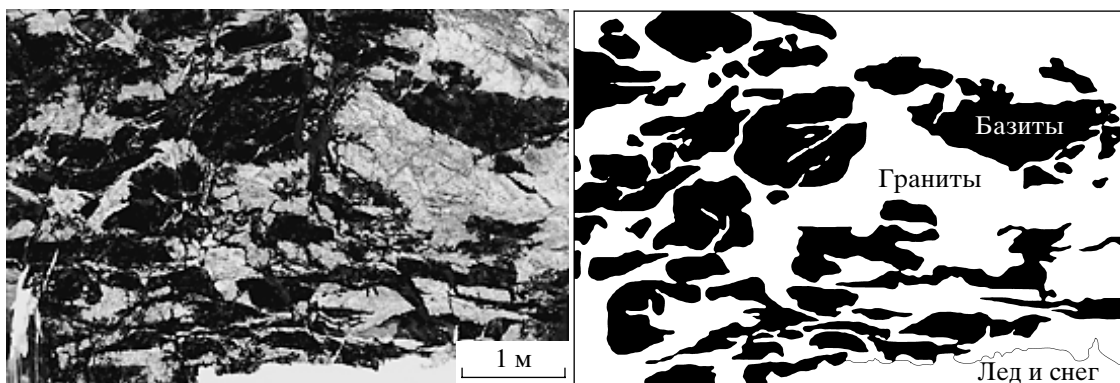


Рис. 10. Соотношения базитов и гранитов в интрузивном теле северной части о-ва Ольхон

В.В. Ярмолюка и соавторов, формирование каледонид в этом секторе литосферной оболочки Земли происходило на протяжении венда–кембрия под постоянным воздействием Северо-Азиатского горячего поля (суперплюма) мантии, что приводило к широкому проявлению щелочного и субщелочного мантийного магматизма. К последнему можно отнести относительно крупные массивы щелочных габброидов (Бирхинский, Крестовский) и щелочные базальты в комбинированных дайках второго типа. Второй эпизод мантийного магматизма, обладающий толеитовой геохимической спецификой, обусловленной плавлением деплетированной литосферной мантии, был проявлен во время коллизии террейна с Сибирским кратоном.

Еще раз хотим подчеркнуть два очень важных момента – связь процессов магматического минглинга со сдвиговым тектогенезом и синметамор-

фический характер того и другого. Поскольку сам метаморфизм является неперменным компонентом коллизионной геодинамики, становится ясным то, что и магма-минглинг в Ольхонском регионе – синколлизонное событие. Такой вывод, на первый взгляд, внутренне противоречив, так как сжатие и соответствующие синметаморфические деформации коллизионных обстановок препятствуют инъекции мантийных магм, их проникновению через кору. Это, однако, не так. Хорошо известно, что неровности самих поверхностей сдвигов приводят к появлению многочисленных локальных зон растяжения (пулл-апарт структуры), сами сдвиговые пластины дезинтегрируются сериями закономерно расположенных трещин отрыва (структуры Риделя). По-видимому, этих условий достаточно для обеспечения дренирования мантийных магм и их продвижения вверх по мощной, но гравитационно неустойчи-

вой коллизионной коре. Можно предположить, что как только сдвиговый тектогенез становится активным участником коллизионного сценария, такая коллизионная система оказывается обреченной на неизбежный распад, коллапс. Один из самых ранних индикаторов этого процесса – син-метаморфический магматический минглинг. Он свидетельствует: еще идет общее сжатие, еще идет метаморфизм, еще реализуется тектоническое течение, и идут складчатые процессы, однако именно в это время уже возникают локальные зоны растяжения. В эту охваченную метаморфизмом и “пластифицированную” геологическую среду, в которой именно в это время происходит и выплавка гранита, впрыскиваются мантийные магмы. Их взаимодействие и приводит к возникновению структур магматического минглинга. Коллапс коллизионных систем реализуется в режиме растяжения, и магматический минглинг – прямое свидетельство этого, индикатор самых ранних стадий коллапса.

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Для понимания характера взаимоотношений гранитов и базитов, а конкретнее – причины неполной смесимости (или полной несмесимости) контрастных по составу расплавов, подчеркнем три основных момента:

1. Резкое различие температуры гранитных и базитовых расплавов (650–800° против 1100–1300°C). Из этого следует, что кислый расплав является достаточно резким “охладителем” для горячих, а иногда и перегретых базитовых магм. Второе важное следствие заключается в том, что в случае близэвтектической температуры вмещающей среды (гранитоиды или метаморфические породы кислого состава) энергетической емкости даже небольших порций базитового расплава будет достаточно для ее плавления. Масштабы такого плавления будут определяться объемом поступающих мантийных расплавов. И, наконец, третьим важным следствием температурных различий является более поздняя кристаллизация кислого расплава, что и отражается в структурно-текстурных признаках сосуществующих кислых и основных пород.

2. Резкое различие вязкости гранитного флюидонасыщенного и “сухого” базальтового расплава и их реологических характеристик. Именно этим объясняется слабая смесимость расплавов, разнообразные реакционные структуры и подушечная текстура базитов в комбинированных дайках. Моделирование характера морфологических характеристик границ жидкостей с разной вязкостью [33] показало, что чем больше различие вязкости, тем причудливее граница сред (рис. 11, Д). При этом морфологические характеристики, полученные в ходе эксперимента, нахо-

дятся в хорошем соответствии с реально существующими природными объектами (см. рис. 11, А–Г).

3. Резкое различие плотности и, соответственно, плавучести (buoyancy) базитового и гранитного расплавов. Частично расплавленная континентальная кора является эффективным барьером на пути продвижения базальтового расплава к поверхности [30]. Базитовый расплав, достигая уровня частично расплавленной коры, начинает “растекаться”, образуя после кристаллизации пластообразные тела. Точно такой же механизм может работать в пределах магматических камер гранитоидного состава. Анализ особенностей морфологии и пространственного положения пластообразных магматических тел в гранитоидных плутонах [40] позволил предложить модель многократного внедрения базитовых расплавов в магматическую камеру (рис. 12), в которой важную роль играет стратификация магматической камеры, обусловленная осаждением кристаллов в нижней части камеры.

Не менее эффективным барьером на пути базитовых магм являются зоны высокотемпературных метаморфических преобразований, определяющих пластическое состояние мощных толщ метаморфических пород. В нижних частях таких зон при внедрении базитовых магм происходит плавление гнейсового субстрата, смешение кислых и основных магм и подъем магматической смеси на верхний уровень, характеризующийся хрупко-пластическими деформациями (образование линейных трещин, заполняющихся магматической смесью). Дополнительный кондуктивный разогрев толщи может обуславливать смену стиля деформаций и внедрение даек в сдвиговых структурах [14] или их последующее вовлечение в складчатые процессы. На нижнем же уровне вязко-пластический стиль деформаций приводит к проявлению процессов метаморфического минглинга, что мы и наблюдаем в пределах Ольхонского коллизионного орогена [18].

В целом же характер процессов минглинга на глубоких уровнях в надсубдукционных и внутриплитных обстановках весьма сходен. Наиболее выразительно признаки минглинга проявлены в верхних частях коры (7–5 км). Роль ловушек для мантийных магм играют магматические камеры, заполненные коровыми гранитоидными выплавками. В коллизионных же обстановках (поздние стадии коллизионного процесса) взаимодействие коровых и мантийных магм имеет свою специфику (см. выше) и происходит на глубинах 7–20 км. Основные же различия проявлений минглинга в разных геодинамических обстановках заключаются в разной степени син-, поздне- и посткристаллизационных деформаций. В условиях растяжения внутриплитных обстановок деформации, выраженные в гнейсовидности салических пород и уплощении фрагментов базитов, связаны толь-

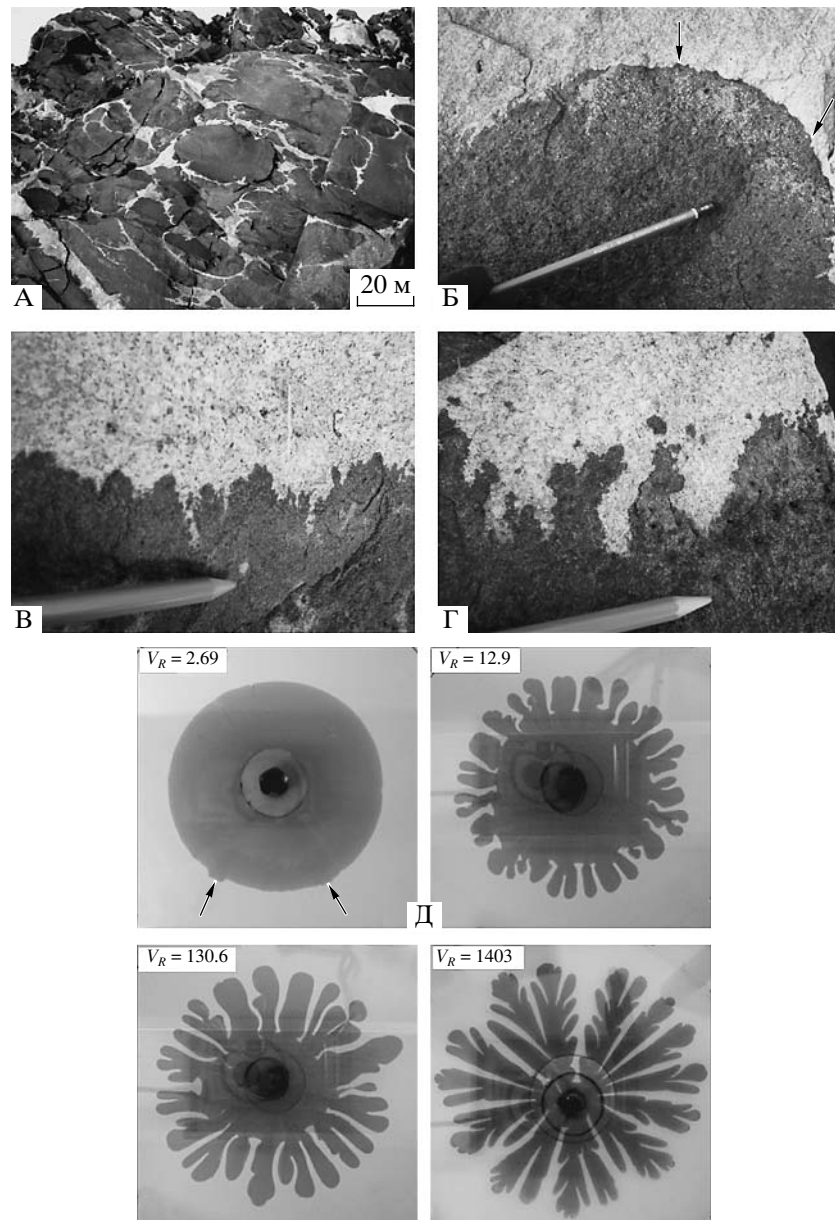


Рис. 11. Характер соотношений гранитов и основных пород интрузивного комплекса Терра Нова (Антарктида) (А–Г) и результаты моделирования (Д) взаимоотношений жидкостей с различной вязкостью (V_R), по [33]

ко с процессами растекания в магматической камере или течением магмы по питающим каналам (дайки). В надсубдукционных обстановках достаточно типичны структуры, связанные с позднекристаллизационными деформациями (гнейсовидность, будинаж, структуры разрыва и фрагментации компетентных базитовых тел). В коллизионных обстановках наблюдается весь спектр деформаций от их полного отсутствия до полной метаморфической переработки комбинированных даек. Более того, характер проявления базитовых тел свидетельствует о приуроченности некоторых комбинированных даек к сдвиговым структурам (см.

рис. 6). Приведенные выше геологические примеры подтверждают тенденцию увеличения интенсивности пластических деформаций магматических пород, участвующих в процессах минглинга, однако ее интерпретация далеко не однозначна. Кроме авторской точки зрения, изложенной выше, возможен и другой вариант объяснения, не связанный со спецификой разных геодинамических обстановок. Легко заметить, что примеры процессов минглинга в разных геодинамических обстановках соответствуют разным уровням земной коры. Гранитоидные плутоны Забайкалья кристаллизовались на глубине 5–7 км [15]. Основ-

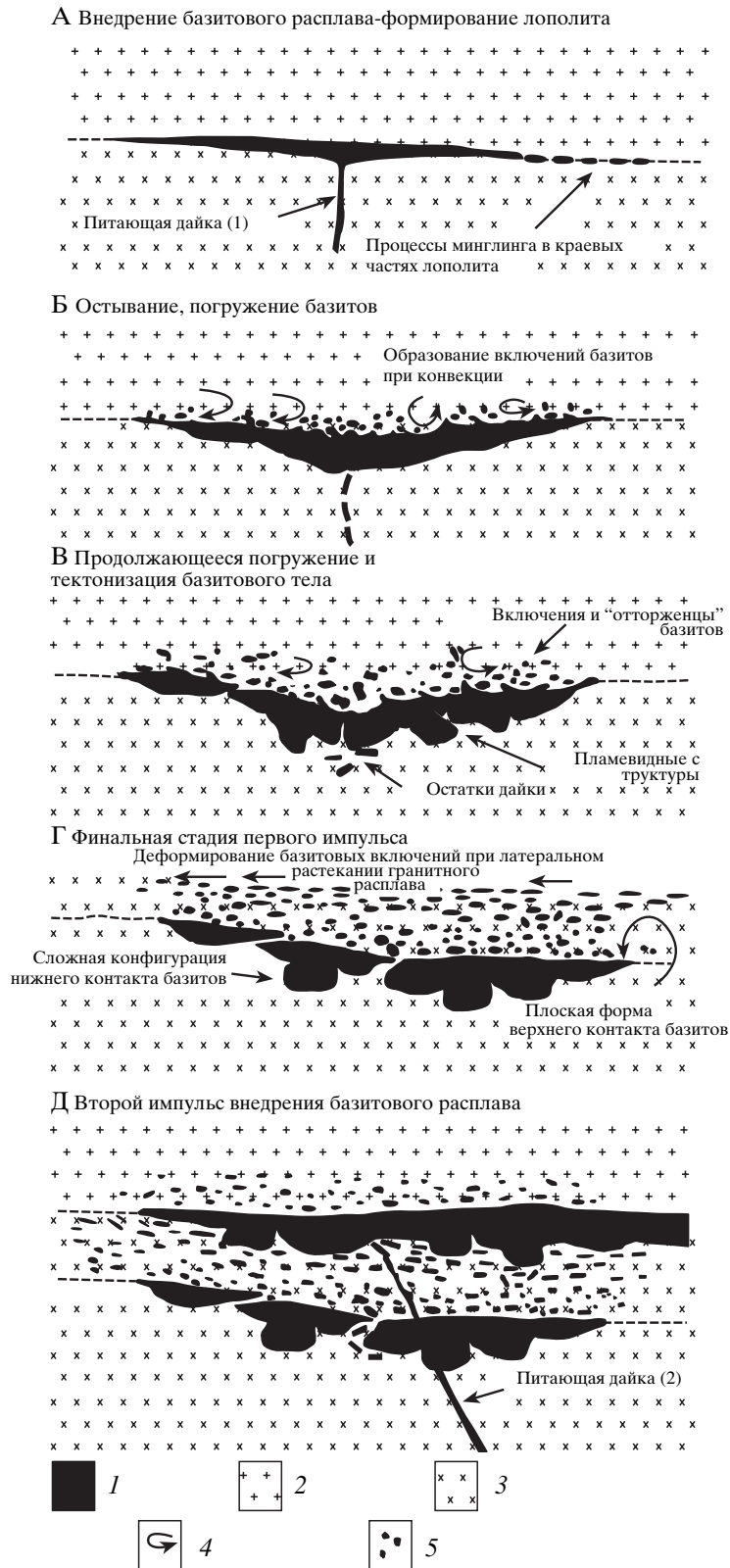


Рис. 12. Модель формирования пластовых базитовых тел в гранитах при последовательном внедрении порций основного расплава, по [40]

1 – габбро-диориты; 2 – гранитная магма; 3 – кумулятивный слой, богатый кристаллами; 4 – направление конвекции в локальных ячейках; 5 – включения базитов

ные этапы эволюции комплекса Чилан соответствуют средним частям коры [29]. И, наконец, уровень проявления процессов минглинга в Ольхонской коллизионной системе отвечает средним–нижним частям коры. Таким образом, разный стиль деформаций может определяться разным уровнем глубинности процессов. Но еще раз подчеркнем роль именно сдвигового тектогенеза в механизме проникновения мантийных магм в нижние и средние горизонты коры, который реализуется далеко не во всех геодинамических обстановках.

Мы сознательно опустили в работе особенности петрологии мантийных и коровых магм в процессе минглинга, поскольку их обсуждение сильно увеличило бы объем статьи. Можно лишь отметить самые общие закономерности: для внутриплитных обстановок характерны щелочные и ультращелочные мантийные выплавки. В надсубдукционных обстановках преобладают базиты известково-щелочного ряда, хотя нередкими являются и основные породы ОИВ-типа. В коллизионных обстановках, как это показано на примере Ольхонской системы, могут встречаться и щелочные базальты, и примитивные толеиты. Состав мантийных и коровых выплавок определяется очень многими факторами, включая состав верхней мантии и геометрию субдуцирующей плиты [23].

Авторы выражают свою благодарность Д.П. Гладкочубу, Т.В. Донской, А.Б. Котову и А.М. Мазукабзову за постоянное сотрудничество в полевых исследованиях Ольхонского региона и обсуждение проблем, затронутых в настоящей работе. Авторы искренне признательны Б.А. Литвиновскому, который прочитал рукопись, участвовал в дискуссии и сделал ценные и интересные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (гранты 05-05-64761 и 05-05-64016), а также в рамках Интеграционной программы РАН–СО РАН “Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бибикова Е.В., Карпенко С.Ф., Сумин Л.В. и др. U-Pb, Sm-Nd, Pb-Pb и K-Ar возраст метаморфических и магматических пород Приольхонья (Западное Прибайкалье). Геология и геохронология Сибирской платформы и прилегающих областей. Л.: Наука, 1990. С. 170–183.
2. Гладкочуб Д.П. Эволюция южной части Сибирского кратона в докембрии–раннем палеозое и ее связь с суперконтинентальными циклами: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 2004. 36 с.
3. Занвилевич А.Н., Литвиновский Б.А., Андреев Г.В. Монголо-Забайкальская провинция щелочных гранитов. М.: Наука, 1985. 232 с.
4. 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. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2004. Вып. 2. Т. 1. С. 141–142.
5. Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. // Геотектоника. 2001. № 3. С. 22–43.
6. Котов А.Б., Мазукабзов А.М., Скляр Е.В., Федоровский В.С. Береговые скалы острова Ольхон: геологические исследования по льду Байкала // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2004. Вып. 2. Т. 1. С. 183–188.
7. Летников Ф.А., Халилов В.А., Савельева В.Б. Изотопный возраст магматических пород Приольхонья // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 1. С. 171–174.
8. Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Алашкин А.М., Подладчиков Ю.Ю. Ангаро-Витимский батолит – крупнейший гранитоидный плутон. Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993. 141 с.
9. 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.
10. Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Калманович М.А., Шадаев М.Г. Синплутонические базитовые интрузии ранних стадий формирования Ангаро-Витимского батолита (Забайкалье) // Геология и геофизика. 1992. № 7. С. 70–80.
11. Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Ляпунов С.М., Биндеман И.Н., Дэвис А.М., Калманович М.А. Условия образования комбинированных базит-гранитоидных даек (Шалутинский массив, Забайкалье) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 7. С. 3–22.
12. Попов В.С. Смешение магм – важный петрогенетический процесс // Записки Всесоюзного мин. обва. 1984. Ч. 113. Вып. 2. С. 229–240.
13. Розен О.М., Федоровский В.С. Коллизионные гранитоиды и расслоение земной коры (примеры кайнозойских, палеозойских и протерозойских коллизионных систем). М.: Книжный мир, 2001. 256 с.
14. Скляр Е.В., Федоровский В.С., Гладкочуб Д.П., Владимиров А.Г. Синметаморфические базитовые дайки – индикаторы коллапса коллизионной структуры Западного Прибайкалья // Докл. АН. 2001. Т. 381. № 4. С. 522–527.
15. Титов А.В., Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Шадаев М.Г. Явления гибридизации в комбинированных базит-лейкогранитных дайках Усть-Хилокского массива (Забайкалье) // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 12. С. 1714–1728.

16. Федоровский В.С. Купольный тектогенез в коллизонной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геотектоника. 1997. Т. 31. С. 483–497.
17. Федоровский В.С., Владимиров А.Г., Хаин Е.В. и др. Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизонных зон каледонид Центральной Азии // Геотектоника. 1995. № 3. С. 3–22.
18. Федоровский В.С., Хромых С.В., Сухоруков В.П., Куйбида М.Л., Владимиров А.Г., Скляр Е.В., Докукина К.А., Чамов С.Н. Метаморфический минглинг (новый тип минглинг-структур) // Тектоника и геодинамика континентальной литосферы: Материалы XXXVI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2003. С. 255–259.
19. Ярмолюк В.В., Литвиновский Б.А., Коваленко В.И., Бор-мин Джань, Занвилевич А.Н., Воронцов А.А., Журавлев Д.З., Посохов В.Ф., Кузьмин Д.В., Сандимирова Г.П. Этапы формирования и источники щелочно-гранитоидного магматизма Северо-Монгольского–Забайкальского рифтового пояса в перми и триасе // Петрология. 2001. Т. 9. № 4. С. 351–380.
20. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П., Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Геодинамика формирования каледонид Центрально-Азиатского складчатого пояса // Докл. АН. 2003. Т. 389. № 3. С. 354–359.
21. Bacon C.R. Magmatic inclusions in silicic and intermediate volcanic rocks // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91. P. 6091–6112.
22. Berthelsen A. Globulith – a new type of intrusive structure, exemplified by metabasic bodies in the Moss area, SE Norway // Norges Geol. Unders. 1970. № 266. P. 70–85.
23. Bonin B. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal sources? A review // Lithos. 2004. Vol. 78. № 1. P. 1–24.
24. Bowen N.L. The evolution of igneous rocks. Princeton. N.J.: Princeton University Press, 1928. 334 p.
25. Clemens-Knott D., Saleeby J.B. Imprinting ring dike complexes in the Sierra Nevada batholith, California: Roots of the Early Cretaceous volcanic arc // Bull. Geol. Soc. Am. 1999. Vol. 114. № 4. P. 484–496.
26. Enclaves and granite petrology / Eds. J. Didier, B. Barbarin Amsterdam: Elsevier, 1991. 625 p.
27. Furman T., Spera F.J. Co-mingling of acid and basic magma with the implications for the origin of mafic I-type xenolith field and petrochemical relations of an unusual dike complex at Eagle Lake, Sequoia National Park, California, USA // Volcanology Geothermal Res. 1985. Vol. 24. P. 151–178.
28. Harker A. The natural history of igneous rocks. London: Muen, 1909. 383 p.
29. Hopson C.A., Mattinson J.M. Chelan migmatite complex, Washington / Eds. D.A. Swanson, R.A. Hauge-rud // Geologic field trips in the Pacific Northwest. GSA Ann. Meeting, 1994. P. 3–21.
30. Huppert H.E., Sparks S.J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust // J. Petrol. 1988. Vol. 29. № 3. P. 599–624.
31. Lejeune A.-M., Richert P. Rheology of crystal-bearing silicate melts: An experimental study at high viscosities // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. № B3. P. 4215–4229.
32. Lipman P.W. The roots of ash-flow calderas in Western North America: windows into the tops of granitic batholiths // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89. P. 8801–8841.
33. Perugini D., Poli G. Viscous fingering during replenishment of felsic magma chambers by continuous input of mafic magmas: Field evidence and fluid-mechanics experiment // Geology. 2005. Vol. 33. № 1. P. 5–8.
34. Pitcher W.S. A multiply and composite batholiths / Eds. W.S. Pitcher, M.P. Atherton, E.J. Cobbing, R.D. Beckinsale // Magmatism at plate edge. Blackie Halsted Press, 1986. P. 93–101.
35. Skilling I.P., White J.D.L., McPhie J. Peperite: a review of magma-sediment mingling // J. Volcanology Geothermal Res. 2002. Vol. 114. № 1–4. P. 1–17.
36. Snyder D., Crambes C., Tait S., Weibe R. Magma mingling in dikes and sills // J. of Geology. 1997. Vol. 105. № 1. P. 75–86.
37. Vogel T.A., Wilband J.T. Coexisting acidic and basic melts: geochemistry of a composite dike // J. of Geology. 1978. Vol. 86. № 3. P. 353–372.
38. Wiebe R.A. Relations between coexisting basaltic and granitic magmas in a composite dike // Amer. J. Science. 1973. Vol. 273. № 2. P. 130–151.
39. Wiebe R.A. Coexisting intermediate and basic magmas, Ingonish, Cape Breton Island // J. of Geology. 1974. Vol. 82. № 1. P. 74–87.
40. Wiebe R.A., Collins W.J. Depositional features and stratigraphic sections in granitic plutons: implications for the emplacement and crystallization of granitic magma // J. Structural Geology. 1998. Vol. 20. № 9/10. P. 1273–1289.
41. Wiebe R.A., Ulrich R. Origin of composite dikes in the Gouldsboro granite, central Main // Lithos. 1997. Vol. 40. № 2–4. P. 157–178.
42. Wilcox R.E. The idea of magma mixing: history of struggle for acceptance // J. of Geology. 1999. Vol. 107. P. 421–432.
43. Zandvilevich A.N., Litvinovsky B.A., Wickham S.M., Bea F. Genesis of alkaline and peralkaline syenite-granite series: the Kharitonovo pluton (Transbaikalia, Russia) // J. of Geology. 1955. Vol. 103. № 2. P. 127–145.

Рецензенты: В.В. Ярмолюк, В.И. Коваленко

Magma Mingling: Tectonic and Geodynamic Implications

E. V. Sklyarov¹ and V. S. Fedorovskii²

¹*Institute of the Earth's Crust, Siberian Division, Russian Academy of Sciences, ul. Lermontova 128, Irkutsk, 664033 Russia*

²*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 7, Moscow, 119017 Russia*
e-mail: west45fvs@umail.ru

Abstract—An attempt is made to consider the tectonic and geodynamic implications of the mingling of mafic and felsic magmas, particularly, the relationships between mafic and felsic igneous rocks in composite dikes and plutons. Magma mingling develops in suprasubduction, intraplate, and collisional settings. The attributes typical of each type of mingling are discussed with special emphasis on the magma mingling of the collisional type, which is related to synmetamorphic shearing and may be regarded as a direct indicator of synorogenic collapse of collisional structural features. This phenomenon is exemplified in the Ol'khon collisional system in Siberia.