

На правах рукописи

**Бурмакина Галина Николаевна**

**МАФИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И КОМБИНИРОВАННЫЕ  
ДАЙКИ В ПОЗДНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ГРАНИТОИДАХ  
ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ: СОСТАВ, ПЕТРОГЕНЕЗИС**

Специальность 25.00.04 – петрология, вулканология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Улан-Удэ  
2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте Сибирского отделения РАН (ГИН СО РАН).

- Научный руководитель:** - доктор геолого-минералогических наук  
**Цыганков Андрей Александрович**
- Официальные оппоненты:** **Изох Андрей Эмильевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией петрологии и рудоносности магматических формаций, Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск)
- Мехоношин Алексей Сергеевич** - кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геохимии основного и ультраосновного магматизма, Институт геохимии им. А.П.Виноградова Сибирского отделения РАН (г. Иркутск)
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения РАН (г. Иркутск)

Защита состоится 25 октября 2013г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д003.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте Сибирского отделения РАН по адресу: 670047, г.Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба.

e-mail: gin@gin.bscnet.ru  
тел./факс: 8(3012)43-39-55  
<http://geo.stbur.ru>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института Сибирского отделения РАН по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба.

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2013 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета  
кандидат геолого-минералогических наук



О.К. Смирнова

**Актуальность.** Меланократовые включения часто встречаются в гранитоидах разного состава. Происхождение включений различно: это могут быть фрагменты субстрата, из которого выплавлялись кислые магмы; они могут быть ксенолитами вмещающих пород, в том числе, захваченными по пути движения магмы к поверхности; могут быть продуктами ранней кристаллизации того же самого расплава (автолиты), и, наконец, могут образоваться в результате смешения магм различного состава. Соответственно, в зависимости от происхождения, включения несут разную петрогенетическую информацию. Поэтому, выяснение природы меланократовых включений является важной составной частью исследований, направленных на расшифровку процессов образования и кристаллизации салических магм. Мафические микрогранулярные включения (mafic microgranular enclaves – ММЕ), представляющие собой продукт смешения (mixing и/или mingling) базальтоидных и салических магм, наиболее характерны для гранитоидов. В широком смысле они рассматриваются как свидетельство мантийно-корового взаимодействия, результатом которого являются определенные типы гранитов, и, возможно, связанная с ними рудная минерализация. В породах плутонической фации ММЕ, как правило, имеют диоритовый, монцодиоритовый, монцонитовый состав, обусловленный процессами гибридизации, т.е. химическим взаимодействием включений с вмещающим салическим расплавом. Поэтому, в каждом конкретном случае задачей исследований является, с одной стороны - доказательство магматической природы включений, с другой - выяснение состава и условий образования исходного для включений расплава. Таким образом, доказательство исходно базальтовой (мантийной) природы включений представляет собой нетривиальную задачу.

Западное Забайкалье характеризуется беспрецедентным по своим масштабам гранитоидным магматизмом [Карта магматических..., 1989]. Согласно современным представлениям [Ярмолюк и др., 1997; Цыганков и др., 2007; 2010; Ковач и др., 2011] основной объем гранитоидов Забайкалья, включая Ангаро-Витимский батолит, сформировался в позднем палеозое. Природа (геодинамика, петрогенезис) широкомащтабного гранитообразования этого периода дискуссионна [Цыганков и др., 2010; Litvinovsky et al., 2011; Donskaya et. al., 2013 и ссылки в этих работах]. При этом одним из ключевых является вопрос источников энергии и вещества (прежде всего калия) для образования столь гигантского объема гранитоидов. Считается [Huppert & Sparks, 1988; Didier & Barbarin, 1991; Литвиновский и др., 1993; 1995; 1999; Litvinovsky et al., 1995; Ярмолюк и др., 1997; Гордиенко и др., 2003; Добрецов, 2005 и многие другие работы], что источником того и другого, а также водного флюида, являются мантийные базальтоидные магмы. Согласно данным [Цыганков и др., 2010; Litvinovsky et al., 2011] базиты, в той или иной форме, ассоциируют с разными типами позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья. Исключение составляет баргузинский комплекс для гранитов которого предполагается чисто коровое происхождение [Цыганков, 2009]. При этом наиболее надежным свидетельством генетической связи гранитоидного и базитового магматизма являются мафические включения в гранитоидах и родственные им комбинированные дайки. Подобные образования выявлены ранее в некоторых позднепалеозойских кварцево-монцонитовых плутонах Забайкалья [Литвиновский и др., 1993], однако в целом, учитывая масштабы и разнообразие гранитоидного магматизма, представляется актуальным поиск и изучение дополнительных свидетельств участия мантийных магм в формировании позднепалеозойской гранитоидной провинции Западного Забайкалья.

Таким образом, актуальность изучения мафических включений и комбинированных даек определяется недостаточной изученностью процессов мантийно-корового взаимодействия при формировании крупных гранитоидных провинций.

**Целью** настоящих исследований являются выяснение природы и механизма образования мафических микрогранулярных включений в позднепалеозойских кварцевых сиенитах Бургасского массива и близковозрастных комбинированных даек Западного Забайкалья.

Достижение поставленной цели обеспечивалось решением следующих **задач**:

1. Изучить геологическое строение Бургасского массива и комбинированных даек Западного Забайкалья.

2. Дать петрографическую характеристику основным разновидностям пород Бургасского массива, уделив особое внимание меланократовым включениям; в сравнительном плане петрографически охарактеризовать породы комбинированных даек, с акцентом на их мафической составляющей.

3. Охарактеризовать петро-геохимические особенности исследуемых пород.

4. Изучить состав породообразующих и аксессуарных минералов в интрузивных породах, меланократовых включениях и комбинированных дайках.

5. На основе полученных геологических данных и вещественных характеристик пород определить происхождение меланократовых включений и их взаимосвязь с комбинированными дайками Западного Забайкалья.

**Фактический материал и методы исследований.** Работа основана на результатах изучения мафических включений из кварцевых сиенитов Бургасского массива. В сопоставительных целях изучены комбинированные дайки Западного Забайкалья.

В основу диссертационной работы положены результаты исследований автора, проводившихся под руководством д.г.-м. н. А.А. Цыганкова в период с 2006 по 2012 г. Исследования проводились в лаборатории петро- и рудогенеза (ныне петрологии) ГИН СО РАН в соответствии с плановыми темами НИР: «Гранитоидный, щелочно-базитовый и карбонатитовый магматизм Западного Забайкалья: процессы генерации, дифференциации и дегазации магм, флюидный перенос вещества и рудообразование» (2007-2009 гг.); «Гранитоидный, щелочно-базитовый и карбонатитовый магматизм Западного Забайкалья: геодинамика, источники вещества, процессы генерации и кристаллизации магм» (с 2010 г.). На разных этапах исследования были поддержаны грантами РФФИ-Байкал (05-05-97205), РФФИ-Сибирь (08-05-98017), РФФИ-МНТИ (Министерство науки и технологий Израиля, 06-05-72007), Интеграционными проектами СО РАН № 37, 17; проектом молодежного Лаврентьевского конкурса СО РАН.

При выполнении диссертационной работы было просмотрено более 400 петрографических шлифов, использовано 135 силикатных анализов (аналитики Г.И. Булдаева, И.В. Боржонова, А.А. Цыренова), сопровождавшихся определением содержания элементов-примесей (Rb, Ba, Sr, Zr, Nb, Y, Pb), выполненных рентген-флуоресцентным методом на установке VRA-30, аналитики Б.Ж. Жалсаарав, Р.Ж. Ринчинова. Кроме того, было использовано 42 анализа редкоземельных элементов и элементов-примесей, выполненных ICP-MS методом в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск), аналитик Е.В.Смирнова и в Томском государственном университете. Химический состав породообразующих и аксессуарных минералов определялся на электронном сканирующем микроскопе LEO 1430 VP, оснащенном энергодисперсионным спектрометром INCA Energy и модернизированном микроанализаторе MAR-3, работающем под управлением программного комплекса MARShell (ГИН СО РАН). Всего выполнено более 3000 определений. Электронно-

зондовые анализы выполнены С. В. Канакиным, электронно-микроскопические исследования проведены Н. С. Кармановым, Е.В. Ходыревой, А.В. Патрахиной.

Для обработки геохимических и минералогических данных использовались стандартные текстовые и графические редакторы пакетов Microsoft Office и Corel-Draw, а так же прикладная геохимическая программа MINPET 2.02.

#### **Научная новизна и практическое значение работы.**

1. Впервые детально изучены меланократовые включения в позднепалеозойских кварцевых сиенитах главной фазы Бургасского плутона, показано, что эти включения образовались в результате механического смешения базитовой и салической магм.

2. Получены новые геологические, петрографические и минералогические данные по комбинированным дайкам Западного Забайкалья.

3. Установлена взаимосвязь ММЕ и комбинированных даек, а также геохимический тип исходных мафических магм, участвовавших в их формировании.

4. Разработана геолого-генетическая модель формирования мафических включений (применительно к Бургасскому плутону).

**Практическое значение работы:** результаты исследований, изложенные в работе, расширяют представления об условиях формирования позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья и могут быть использованы при разработке легенд к новому поколению геологических карт.

#### **Защищаемые положения:**

1. Мафические включения в Бургасском кварцевосиенитовом массиве (Западное Забайкалье) имеют магматическое происхождение и представляют собой интенсивно гибридизированные фрагменты базальтового расплава, т.е. являются продуктами смешения.

2. Базальтовый расплав, исходный для мафических включений и базитовой составляющей комбинированных даек принадлежит к внутриплитному геохимическому типу (ОИВ), обладая рядом характерных особенностей, связанных с типом мантийного источника и степенью глубинной дифференциации.

3. Мафические включения и комбинированные дайки Западного Забайкалья – это генетически родственные образования, сформировавшиеся в разных реологических условиях и при различном объемном соотношении мафического и салического компонентов. Последний фактор определял масштабы гибридации мафических компонентов.

**Апробация работы.** По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Основные положения диссертации докладывались на научных совещаниях и конференциях: научно-практической конференции «Проблемы геологии, минеральных ресурсов и геоэкологии Западного Забайкалья» (Улан-Удэ, 2007); международной конференции «Петрология магматических и метаморфических комплексов» (Томск, 2007; 2009); международной конференции «Граниты и эволюция земли: геодинамическая позиция, петрогенезис и рудоносность гранитоидных батолитов» (Улан-Удэ, 2008); XII Международном научном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоение недр» (Томск, 2009); XXIII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2009); Молодежной конференции «Геохимия магматических пород» (Иркутск, 2009); Международной конференции, посвященной 90-летию Ильменского государственного заповедника, 90-летию со дня рождения академика П.Л. Горчаковского и 180-летию со дня рождения академика П.В. Еремеева «Наука, природа и общество»

(Миасс, 2010); XI Всероссийском петрографическом совещании «Магматизм и метаморфизм в истории земли» (Екатеринбург, 2010), II Всероссийской молодежной школе-семинаре «Геохимия, петрология и рудоносность базит-ультрабазитовых комплексов» (Иркутск, 2010); Международной конференции, посвященной 80-летию основания в Томском политехническом университете первой в азиатской части России кафедры «Разведочное дело» (Томск, 2010); V Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2010); Всероссийской молодежной конференции «Геология Западного Забайкалья» (Улан-Удэ, 2011); Всероссийской научно-технической конференции «Геонаука», посвященной 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова (Иркутск, 2011); Научном совещании «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса, от океана к континенту» (Иркутск, 2011), а также на ежегодных научных сессиях Геологического института СО РАН, г. Улан-Удэ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы. Общий объем работы 176 машинописных страниц, в том числе 81 рисунок, 7 таблиц. Список литературы состоит из 106 наименований.

**Благодарности.** Работа была выполнена в лаборатории петрологии ГИН СО РАН. Автор выражает глубокую признательность д.г.-м.н. А.А. Цыганкову за научное руководство, поддержку и постоянную помощь в проведении исследований и оформлении диссертации. Полевые исследования проводились в сотрудничестве с И.В. Бурдуковым, В.Б. Хубановым, Т.Н. Анциферовой, Б.Ц. Цыреновым, А.А. Хромовым, А.В. Максимовым. Различные аспекты работы обсуждались с Ф.Г. Рейфом, А.С. Мехоношиным, В.Б. Хубановым, Г.С. Риппом, Т.Т. Врублевской, А.Л. Елбаевым. Особую благодарность автор выражает сотрудникам аналитических подразделений ГИН СО РАН: Н.С. Карманову, Е.В. Ходыревой, А.В. Патрахиной, С.В. Канакину за проведение высококачественных электронно-микроскопических и микрозондовых анализов. Аналитические работы выполняли А.А. Цыренова, Г. И. Буддаева, И.В. Боржоннова, Б. Ж. Жалсараев, Р.Ж. Ринчинова и другие сотрудники лаборатории ФМА и ХСМА Геологического института СО РАН, а также аналитики ИГХ СО РАН (Иркутск) и ТГУ (Томск). Автор благодарит всех перечисленных коллег. Кроме того автор признателен работником шлифовальной мастерской Н.Ф. Паданиной и М.Л. Воробьеву за изготовление большого количества шлифов и препаратов для микрозондовых и электронно-микроскопических исследований.

## **ГЛАВА 1. МАФИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ДАЙКИ, КАК РАЗНЫЕ ФОРМЫ СМЕШЕНИЯ КОНТРАСТНЫХ МАГМ**

Смешению разных по составу магм долгое время не придавалось особого петрогенетического значения. По-видимому, это было обусловлено сравнительной редкостью явных геологических признаков смешения магм, а также слабой изотопно-геохимической изученностью магматических образований, прежде всего гранитоидов, для которых процессы смешения имеют наиболее важное значение. Ситуация стала кардинально меняться 20-30 лет назад, когда появились убедительные геологические данные и расчетные модели, согласно которым крупномасштабный гранитоидный магматизм инициируется мантийными магмами, что не может не сопровождаться их каким-либо взаимодействием. В настоящее время принято различать два крайних типа смешения магм [Didier & Barbarin, 1991]: mingling - механическое смешение без существенного химического взаимодействия, и mixing - полная гомогени-

зация смешивающихся магм с образованием гибридного расплава промежуточного состава. Наиболее ярким проявлением минглинга являются комбинированные (композитные) дайки и мафические включения в гранитоидах или кислых вулканитах, тогда как миксинг фиксируется, главным образом, в изотопных характеристиках магматических образований. Вместе с тем, «смешанные» изотопные метки могут и не быть результатом смешения магм. Одним из подходов к решению этой задачи является сочетание изотопных исследований гранитоидов с детальным изучением содержащихся в них меланократовых включений и комбинированных даек [Dallai et al., 2003; Tsuboi, 2005; Naapala et al., 2007; Katzir et al., 2007; Slaby & Martin, 2008 и многие другие.]

Согласно сводке [Didier & Barbarin, 1991] меланократовые включения подразделяются на несколько генетических типов, характеризующихся разными морфологическими особенностями и, соответственно, разными условиями образования: - это ксенолиты, ксенокристаллы, слюдястые включения, шпирь, фельзические микрогранулярные включения, мафические микрогранулярные включения и кумулятивные включения (автолиты).

Существует большое количество гипотез образование меланократовых включений которые можно разделить на две основные группы [Barbarin & Didier, 1991]. В гипотезах первой группы включения рассматриваются как изначально твердые породы осадочного, метаморфического или изверженного происхождения. Эти породы представлены ксенолитами или реститами. Согласно гипотезам второй группы, ММЕ образовались из кристаллизующейся магмы. Доказательством этого являются типичные текстуры изверженных пород, детально описанные тонкозернистые оторочки во многих ММЕ, конформные текстуры течения ММЕ и вмещающих гранитоидов, отсутствие деформации зерен даже в сильно вытянутых включениях, присутствие фенокристаллов, располагающихся поперек контакта. Все эти признаки свидетельствуют о том, что ММЕ и вмещающие их гранитоиды были одновременными магмами. При этом мафическая магма могла быть когенетична фельзической, или могла образоваться в верхней мантии.

Комбинированные (composite) дайки, согласно [Wiebe & Ulrich, 1997] состоят из контрастных одновременных мафических и салических магм и широко распространены во многих бимодальных магматических сериях.

Выделяется два главных типа комбинированных даек: дайки а) с мафическими краевыми зонами, центральной салической частью и переходной зоной, представляющей собой продукт их взаимодействия; б) дайки с салической краевой зоной и существенно базитовой центральной, представляющей собой пиллоуподобные обособления базитового материала с аплитовым, микрогранитным или кварцевосиенитовым «цементом». Оба типа даек всегда ассоциируют с крупными одновременными плутоническими комплексами. При этом чаще всего доминируют дайки одного типа.

В данной работе рассматриваются дайки второго типа. Примерно до 80-х годов прошлого столетия обсуждалось три возможных механизма их образования [Литвиновский и др., 1995]: 1) интрузия расплава, распадающегося при внедрении на две несмешивающиеся жидкости; 2) магматическое обрушение боковых пород с последующей дезагрегацией обломков, их абразией, либо частичным усвоением в магматическом потоке; 3) механическое смешение контрастных по составу магм со слабым проявлением химического взаимодействия. Последняя точка зрения разделяется большинством исследователей.

Таким образом, обзор литературы показывает, что мафические включения и комбинированные дайки уже на протяжении столетия являются предметом интенсивных и разноплановых исследований. Вместе с тем, несмотря на достаточно четкие признаки, позволяющие отличить продукты смешения магм от производных других петрогенетических процессов, каждый конкретный случай требует всестороннего изучения. Не ослабевающий интерес к данной проблеме обусловлен тем, что только в последние полтора – два десятилетия стало ясно, что, во-первых, смешение магм может иметь совершенно разные формы проявления и, во-вторых, может быть определяющим фактором при формировании крупных магматических комплексов.

## **ГЛАВА 2. МАФИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ДАЙКИ В ГРАНИТОИДАХ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

Необычные образования дайковой морфологии, сложенные базитовым и салическим материалом, были известны на территории Забайкалья давно. Однако, лишь в работах Б.А.Литвиновского с коллегами [Литвиновский и др., 1995а; 1995б; Титов и др., 1998; 2000; Zanvilevich et al., 1995], было показано, что эти образования представляют собой комбинированные дайки. Было дано описание их геологического положения и внутреннего строения, приведена минерало-геохимическая характеристика слагающих их пород, предложен механизм формирования.

Меланократовые включения в гранитоидах Западного Забайкалья - явление нередкое, однако их систематического изучения практически не проводилось. Исключение составляет монография Б.А. Литвиновского с соавторами (1993), в которой приведены результаты детального изучения синплутонических базитов, в том числе, мафических включений, в позднепалеозойских монцонитоидах и кварцевых сиенитах Романовского (Витимское плоскогорье) и Нестерихинского (Баргузинский хребет) плутонов.

Наши исследования мафических включений и комбинированных даек Западного Забайкалья продолжают эти работы. Существенным отличием является то, что нами изучены новые объекты и, что не менее важно, использованы современные аналитические методы, позволившие получить новую петрогенетическую информацию. Следует подчеркнуть, что изучение Бургасского массива проведено впервые. Более того, публикации по нему до наших работ, вообще отсутствовали. Изучение комбинированных даек базировалось как на известных участках, так и на новых, обнаруженных нами.

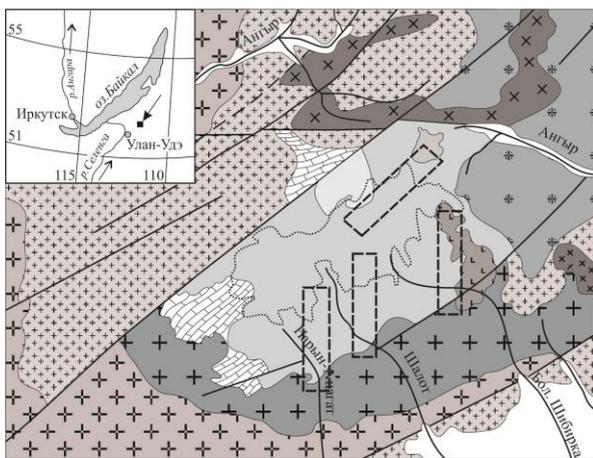
Во время геолого-съемочных работ масштаба 1:50000, проводившихся в 60-е годы прошлого века [Рейф и др., 1970], Бургасский массив, сложенный в основном кварцевыми сиенитами (граносиенитами), был отнесен к мезозойскому этапу магматизма. Однако, U-Pb датирование цирконов (SHRIMP-II) из кварцевых сиенитов второй фазы массива дало возраст  $287.3 \pm 4.1$  млн. лет – ранняя пермь [Цыганков и др., 2010]. Повышенная основность и калиевая щелочность пород массива, наличие габброидов в составе первой интрузивной фазы, в совокупности с изотопным возрастом, позволили включить плутон в состав чивыркуйского комплекса, формирование которого охватывает период с 305 до 285 млн. лет назад [Цыганков и др., 2010].

Бургасский интрузив расположен в осевой части хребта Улан-Бургасы и на его юго-восточных и южных склонах, примерно в 50 км к востоку от г. Улан-Удэ. Выходы пород массива на поверхность занимают площадь около 100 км<sup>2</sup>. Согласно данным геолого-съемочных работ в строении Бургасского массива выделяют три интрузивных фазы (рис. 1): 1) субщелочные габбро, среднезернистые сиениты и монцититы, слага-

ющие два небольших тела (4% площади массива); 2) среднезернистые порфировидные кварцевые сиениты главной фазы (не менее 80 %); 3) аляскитовые граниты и гранит-порфиры, образующие два небольших штока.

Вмещающие образования представлены позднепалеозойскими гранитами баргузинского и зазинского комплексов, временной интервал формирования которых, в данном районе, составляет 325 – 393 млн. лет [Цыганков и др., 2007; 2010]. В юго-западной и северной части породы массива прорывают кембрийские карбонатные отложения мылдылгенской свиты, на востоке – контактируют с лавами и туфами трахиандезитов и трахириолитов цаган-хунтейской свиты.

Бургасский кварцосиенитовый массив характеризуется необычайно широким распространением меланократовых включений. Они встречаются практически повсеместно, однако плотность распределения существенно варьирует по площади массива. В массовом количестве ММЕ появляются выше гипсометрической отметки 1450 – 1500 метров над уровнем моря, т.е. приурочены к центральной части массива (рис. 1.) совпадающей с водораздельной частью хр. Улан-Бургасы. Гипсометрически ниже, т.е. в краевых зонах массива, включения также встречаются, однако их количество на порядок меньше. Включения представляют собой тонко- или мелкозернистые массивные породы, цвет которых, в зависимости от зернистости, варьирует от почти черного или буровато-черного (тонкозернистые разновидности), до серого. Часто хорошо различимы вкрапленники полевых шпатов. За счет меньшей зернистости, по сравнению с вмещающими кварцевыми сиенитами, включения меньше подвергаются



**Рис. 1. Фрагмент геологической карты масштаба 1:200000, Прибайкальская серия, лист №-49-XXXI.**

1 - KZ отложения; 2 - известняки и доломиты мылдылгенской свиты (С); 3 - гранитоиды зазинского комплекса: а) мелкозернистые биотитовые граниты, б) средне-крупнозернистые лейкограниты; 4 - порфировидные кварцевые сиениты чивыркуйского комплекса; 5- габбро, монцогаббро, монцитоны I-ой фазы, 6 - порфировидные кварцевые сиениты II-ой фазы, 7 - гранит-порфиры III-ей фазы; 8 – трахиандезиты цаган-хунтейской свиты; 9 - граниты баргузинского комплекса: а) среднезернистые, б) крупнозернистые; 10 - разрывные нарушения; 11 - нижняя граница (1450-1500 м н.у.м.) массового распространения мафических включений; 12 - участки работ.

- 1 [Blank box]
- 2 [Cross-hatch pattern]
- 3 [Stippled pattern]
- 4 [Dark grey box with 'x' symbols]
- 5 [Light grey box]
- 6 [Medium grey box]
- 7 [Dark brown box]
- 8 [Dark brown box with 'L' symbols]
- 9 [Stippled pattern with 'a' and 'б' symbols]
- 10 [Diagonal line pattern]
- 11 [Dotted pattern]
- 12 [Dashed line pattern]

9

выветриванию и поэтому выступают на поверхности в виде «наростов». Размеры включений варьируют от долей сантиметра, до 30 – 40 сантиметров в поперечнике (редко больше), но в среднем составляют 10 – 15 сантиметров. Преобладают включения округлой формы. Плотность распределения ММЕ варьирует от нескольких до 15 – 20 штук на квадратный метр. Иногда наблюдаются сгущения включений или «рои» (swarms), в которых на долю включений приходится более 50% объема всей породы. Характерно, что в «рое» присутствуют включения, различающиеся по текстурно-структурным особенностям, но имеющие признаки магматического происхождения (моногенные рои [Didier & Barbarin, 1991]). В большинстве случаев, даже в роях, ни каких изменений кварцевых сиенитов на контакте с включениями не наблюдается.

В Западном Забайкалье выходы комбинированных даек, с учетом обнаруженных нами, прослеживаются в виде полосы северо-восточного простираения от нижнего течения реки Хилок до полуострова Святой нос. В пределах этой полосы подробно изучено несколько участков: Харитоново, Усть-Хилок, Жирим, Шалуты, хр. Улан-Бургасы (несколько точек), Максимиха. В большинстве случаев дайки прорывают позднепалеозойские (325-280 млн. лет) гранитоиды баргузинского и зазинского комплексов [Литвиновский и др., 1995 а,б]; на Харитоновском участке несколько сближенных комбинированных даек интродуцируют позднетриасовые (229 - 230 млн. лет, U-Pb [Reichow et al., 2010]) щелочно-полевошпатовые сиениты одноименного массива [Zanvilevich et al., 1995], а на участке «Максимиха» - раннедокембрийские (?) гнейсы таланчанской толщи.

Внутреннее строение комбинированных даек всех участков однотипно: они состоят из пиллоуподобных обособлений (нодулей) основных пород, цементированных кислым (кварцевые сиениты, кварцевые монцититы, граниты, аплиты) материалом, что соответствует второму типу по [Wiebe & Ulrich, 1997]. Соотношения базитовой и салической составляющих широко варьирует даже в пределах одной дайки; иногда прослеживаются переходы простых базитовых даек в комбинированные [Литвиновский и др., 1995].

Размеры базитовых «нодулей» также широко варьируют - от первых сантиметров до 2 - 2.5 м в поперечнике. Форма овальная, округлая, иногда почти идеально шарообразная; нередко встречаются удлинённые, линзовидные, пламевидные базитовые обособления; в некоторых дайках хорошо проявлены текстуры течения. В большинстве случаев наблюдаются зоны закалки и фестончатые края, свидетельствующие о сосуществовании двух жидкостей с разной температурой и вязкостью. По морфологии, условно, можно выделить две разновидности комбинированных даек: 1 - субгоризонтальные силло- или дайкоподобные тела с неясными контактами, представляющие собой, по сути дела, полосу относительно сближенных базитовых обособлений, цементированных гранитоидным материалом, несколько отличающимся по составу от вмещающих пород; 2 – относительно крутопадающие (30 – 50 °) дайки с четкими секущими контактами.

Таким образом, наиболее важные геологические признаки, указывающие на магматическое происхождение мафических включений в породах плутонической фации (Бургасский массив, литературные данные) и базитовых нодулей комбинированных даек следующие:

- 1) округлая, нередко сферическая форма, характерная для эмульсии одной жидкости (расплава) в другой, фестончатые края и зоны закалки базитовых обособлений;

- 2) широкое распространение ММЕ по площади массивов, причем в Бургасском плутоне краевые части содержат заметно меньше включений, чем центральная;
- 3) отсутствие в ближайшем окружении рассматриваемых массивов пород, близких по составу к ММЕ;
- 4) вариации текстурно-структурных особенностей ММЕ внутри моногенных роев, а в особенности, наличие полигенных роев, указывающее на механическую сегрегацию включений, что возможно лишь в жидкости;
- 5) сходный стиль пластических деформаций ММЕ (Нестерихинский массив) и базитовых нодулей в некоторых дайках (текстуры течения).

Таким образом, приведенные выше геологические наблюдения со всей определенностью указывают на магматическое происхождение (кристаллизация из расплава) рассматриваемых образований.

### ГЛАВА 3. МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Состав мафических включений из кварцевых сиенитов Бургасского плутона охватывает широкий диапазон петрографических разновидностей – от монцодиоритов, через монцониты и кварцевые монцониты до кварцевых сиенитов, при этом крайние члены этого ряда пользуются весьма ограниченным распространением, тогда как монцонитоиды являются наиболее типичными представителями ММЕ. Микроструктуры включений, в зависимости от состава, варьируют от долеритоподобных и пойкилоофитовых, до гипидиоморфных (микрогаббровых) или монцонитовых с характерными порфиробластами щелочного полевого шпата и вкрапленниками плагиоклаза. Включения сложены плагиоклазом (47 - 68 об. %), щелочным полевым шпатом (8 - 32 об. %), темноцветными минералами (*Bt*, *Amp* ± *Cpx*) - до 17 об. % и кварцем (3 - 5 об.%) (здесь и далее объемные соотношения минералов по CIPW). Аксессуары минералы: магнетит, мангано-ильменит (до 8 мас. % MnO), титанит, апатит и циркон.

Комбинированные дайки, состоят из двух контрастных по составу типов пород – базитов и гранитоидов. Для целей настоящей работы наибольшее значение имеет базитовая составляющая комбинированных даек, варьирующая по составу от трахибазальтов (субщелочных габброидов) до трахиандезитов (монцонитов). Микроструктура микродиабазовая иногда порфиристая. Породы состоят из плагиоклаза (57 – 61 об. %), темноцветных минералов (*Amp*, *Bt*, ± *Cpx* – в сумме до 20 %), при этом амфибол, как правило, преобладает над биотитом, а пироксена, если он есть, составляет не более 1 – 2 об. %. Количество *Kfs* обычно не превышает первых об. %; доля аксессуарных минералов может достигать 7 - 8 об. %: магнетит, апатит, титанит, ильменит, циркон.

Плагиоклаз в мафических включениях представлен зональными порфиробластами и их гломеропорфиробластными сростаниями, а также лейстовидными или удлинено-таблитчатыми зернами (*An*<sub>39-23</sub>). Среди вкрапленников выделяются две разновидности: а) простые вкрапленники с зональностью роста (*An*<sub>47-20</sub>); б) сложно-зональные кристаллы, состоящие из лабрадор-битовнитового ядра (*An*<sub>73-60</sub>), промежуточной зоны (*An*<sub>50-38</sub>), примерно соответствующей составу центральных частей простых вкрапленников, и олигоклазовой каймы (*An*<sub>34-15</sub>), близкой по составу к кристаллам основной массы. Ядра таких кристаллов явно резорбированы, в результате чего они приобретают линзовидную, округлую или неправильную форму с заливообразными контурами. Переход от ядра к промежуточной зоне достаточно плавный, тогда как от промежуточной к краевой – значительно более резкий, с уменьшением

основности более чем на 20 мол. % *Al*. По-видимому, именно этот переход фиксирует резкую смену состава среды минералообразования (состава расплава), что, по нашему мнению связано с его гибридизацией.

Морфологические особенности щелочного полевого шпата зависят от его содержания во включениях. При минимальном количестве (несколько процентов), он образует редкие ксеноморфные выделения. При максимальном (до 30 об. % во включениях) образует крупные (до 1 см) порфиробласты придающие породам монцонитовую структуру.

Амфибол и биотит - главные темноцветные минералы. Их соотношение варьирует от  $\approx 1:1$ , до резкого преобладания того или другого минерала. Амфибол по составу отвечает магнезиальной роговой обманке [Leake et.al., 1997] и часто содержит реликты моноклинного пироксена, который в другой форме не встречается.

Типоморфными разностями пород первой интрузивной фазы являются монцониты, тогда как субщелочные биотит-ортоклазовые габбро, кварцевые монцониты и сиениты имеют ограниченное распространение. Главным петрографическим отличием монцонитов первой фазы от мафических включений являются: 1) более крупнозернистая структура, характерная для пород плутонической фации; 2) отсутствие реликтов основного плагиоклаза; 3) более кислый состав вкрапленников. В совокупности эти отличия свидетельствуют о разных условиях кристаллизации и вероятно разном составе магм, родоначальных для ММЕ и пород первой фазы массива.

Породы второй - главной фазы Бургасского плутона представлены исключительно кварцевыми сиенитами. Это массивные порфиroidные (*Kfs*) среднезернистые породы розовато-серого цвета, сложенные щелочным полевым шпатом (25 - 30 об. %), плагиоклазом (45 - 60 об. %), кварцем (10 - 15 об. %), биотитом и амфиболом на долю которых, в совокупности приходится 5 - 10 об. %, при этом биотит обычно преобладает над амфиболом. Акцессорные минералы: магнетит, титанит, апатит, циркон. Вариации состава пород в целом незначительны, за исключением «роев», где иногда кварцевые сиениты, цементирующие мафические включения, становятся более меланократовыми за счет увеличения количества биотита и уменьшения кварца. Кроме того, они приобретают необычную для пород второй фазы структуру: в них крупные кристаллы кварца, полевых шпатов (*Pl + Kfs*), биотита и амфибола цементируются тонкозернистым гранобластовым кварц-полевошпатовым агрегатом, на долю которого приходится 15 - 20 общего объема породы.

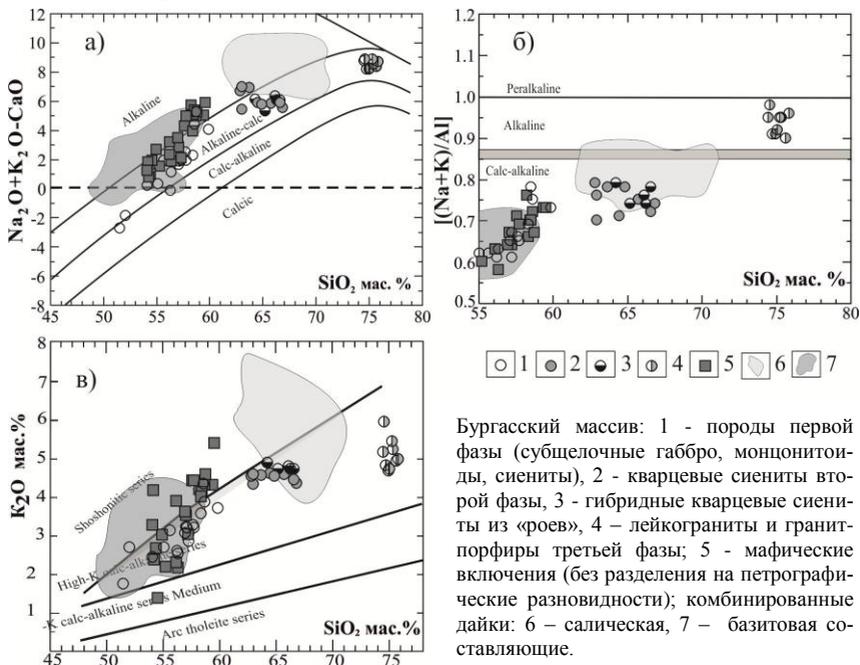
Породы третьей интрузивной фазы Бургасского массива представлены аляскиновыми гранитами и гранит-порфирами, представляющими собой массивные желтовато-серые породы с отчетливо различимыми вкрапленниками кварца и пертитового щелочного полевого шпата. Породы сложены плагиоклазом (15 - 20 об. %), щелочным полевым шпатом (45 - 50 об. %), кварцем (30 - 35 об. %) и биотитом (< 2 об. %). На долю акцессорных минералов (магнетит, гематит, апатит, циркон) приходится до 0.5 об. %. Кроме того, гранит-порфиры содержат убогую молибденитовую минерализацию.

Минералого-петрографические характеристики базитов комбинированных даек весьма близки к ММЕ, отличаясь, главным образом, отсутствием *Kfs*, *Qtz* и кислотоплагиоклаза.

#### ГЛАВА 4. ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ПОРОД БУРГАССКОГО

## МАССИВА И КОМБИНИРОВАННЫХ ДАЕК

Состав пород Бургасского массива варьирует от субщелочного габбро ( $\approx 52$  мас. %  $\text{SiO}_2$ ) до лейкогранита (74.5 - 76 мас. %  $\text{SiO}_2$ ), однако преобладают разности среднего (монцитонитиды) и умеренно кислого (кварцевые сиениты) состава повышенной ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  до 11 мас. %) щелочности. На дискриминантных диаграммах породы всех трех интрузивных фаз образуют дискретные ареалы фигуративных точек без промежуточных разновидностей [Патрушева, Цыганков, 2008; Бурмакина, Цыганков, 2013].



Бургасский массив: 1 - породы первой фазы (субщелочные габбро, монцитонитиды, сиениты), 2 - кварцевые сиениты второй фазы, 3 - гибридные кварцевые сиениты из «роев», 4 - лейкограниты и гранит-порфиры третьей фазы; 5 - мафические включения (без разделения на петрографические разновидности); комбинированные дайки: 6 - салическая, 7 - базитовая составляющие.

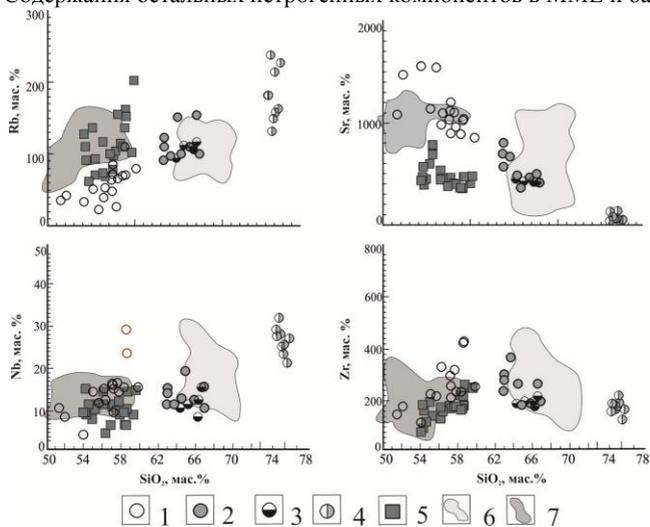
**Рис.2.** Состав пород Бургасского массива и комбинированных даек на классификационных диаграммах: а)  $\text{SiO}_2$  – MAFI (модифицированный щелочно-известковый индекс [Frost, et al., 2001]; б)  $\text{SiO}_2$  –  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ , мол. %; в)  $\text{SiO}_2$  -  $\text{K}_2\text{O}$  – для известково-щелочных плутонических пород (границы линии по [Rickwood, 1989]).

Химический состав пород первой фазы наиболее изменчив (52 – 60 мас. %  $\text{SiO}_2$ ), при этом уменьшение основности пород сопровождается увеличением общей щелочности. Содержание кремнезема в кварцевых сиенитах второй фазы составляет 63 - 69 мас. %, суммарная щелочность слабо уменьшается по мере увеличения содержания  $\text{SiO}_2$ . Лейкограниты и гранит-порфиры третьей фазы обладают наиболее выдержанным составом: 74 - 75.8 мас. %  $\text{SiO}_2$ , 8.7 - 9.7 мас. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ . Все основные разновидности пород, включая ММЕ, металюминиевые, индекс насыщения глиноземом ( $\text{A}/\text{CNK}$ ) возрастает от 0.7 в монцитонитах первой фазы до 1.04 в лейкогранитах. Отношение суммы щелочей к алюминию ( $\text{NK}/\text{Al}$ ) увеличивается от первой

фазы к третьей от 0.55 до 0.98. Валовой химический состав меланократовых включений варьирует наиболее широко: содержание кремнезема составляет 54 - 60 мас. %, при общей щелочности 6.5 - 11 мас. %. Возрастание щелочности происходит в основном за счет калия. Так с увеличением содержания  $\text{SiO}_2$  в ММЕ отношение  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  возрастает от 0.2 до 1.3, тогда как в равных по основности монцонитоидах первой фазы не превышает 1. Породы всех трех интрузивных фаз Бургасского массива относятся к высоко-калиевой известково-щелочной (h-K CA) серии (рис. 2). Следует отметить, что точки состава пород первой фазы располагаются вдоль линии, разделяющей поля h-K CA и шошонитовой серий (рис. 2 в), тогда как равные по кремнекислотности мафические включения пересекают эту линию за счет большей калиевой щелочности наиболее богатых  $\text{SiO}_2$  разновидностей. Такой тренд интенсивного накопления калия с ростом кремнекислотности условно можно назвать «трендом» гибридизации, в отличие от «магматического» тренда пород первой фазы.

Каждая из трех интрузивных фаз Бургасского плутона на диаграммах образует дискретные поля фигуративных точек, различающиеся как по содержанию кремнезема, так и по концентрациям всех остальных породообразующих оксидов. В целом, содержание всех петрогенных компонентов, за исключением калия, уменьшается от первой фазы к третьей, т.е. с ростом кремнекислотности. Меланократовые включения по соотношению  $\text{FeO}^*$ ,  $\text{MgO}$  с кремнеземом полностью перекрываются с монцонитоидами первой фазы, тогда как содержания  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  не менее чем в 1.5 раза ниже. Также понижено содержание  $\text{CaO}$ , хотя и в меньшей степени, а  $\text{Al}_2\text{O}_3$  заметно выше.

Базитовая и салическая составляющие комбинированных даек также образуют дискретные ареалы без промежуточных разностей. Базиты характеризуются более высокими концентрациями  $\text{TiO}_2$  (до 1.67 мас. %) и  $\text{P}_2\text{O}_5$  (до 0.65 мас. %), что сопоставимо с породами первой фазы Бургасского массива и заметно больше, чем в ММЕ. Содержания остальных петрогенных компонентов в ММЕ и базитах комбинирован-



**Рис. 3. Соотношение некоторых элементов-примесей (Rb, Nb, Sr, Zr) с  $\text{SiO}_2$ , условные обозначение см. рис. 2.**

ных даек сопоставимы. Салическая часть даек, напротив, по большинству компонентов отличается от кварцевых сиенитов Бургасского плутона.

Соотношения индикаторных эле-

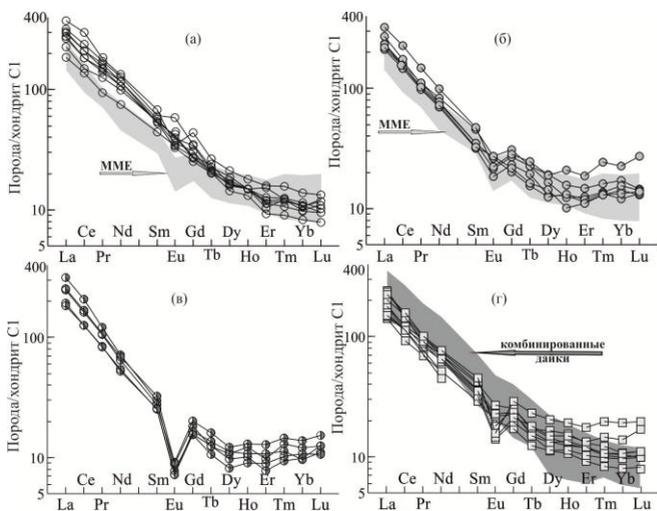
ментов-примесей с кремнеземом показаны на рисунке 3. В целом в породах Бургасского массива содержание Rb и Nb, также как и калия, возрастает от первой фазы к

третьей, Sr уменьшается, тогда как содержание циркония примерно одинаково во всех типах пород интрузии.

Меланократовые включения и базиты комбинированных даек резко отличаются от других пород равной основности (монцонитоидов первой фазы), а также от вмещающих кварцевых сиенитов пониженным содержанием Sr, Zr, и лишь по ниобию «перекрываются» с ними. При этом для всех рассматриваемых элементов характерна более (Rb, Sr, Zr) или менее (Nb) выраженная корреляция с SiO<sub>2</sub>.

Распределение REE в породах Бургасского массива и базитах комбинированных даек (рис. 4) характеризуется резкой дифференцированностью спектра с обогащением пород LREE. В наибольшей степени это характерно для монцонитоидов первой фазы (рис. 4 а), в которых величина La/Yb<sub>(n)</sub> отношения, в среднем, составляет 26.4. В кварцевых сиенитах второй фазы (рис. 4 б) отношение La/Yb<sub>(n)</sub> заметно ниже – 16.2, что коррелирует с более низким общим содержанием REE в этих породах: ΣREE = 219 г/т, против 282 г/т в монцонитах. Из этих соотношений следует, что кварцевые сиениты не могут быть дифференциатами монцонитоидов первой фазы. Содержание (Σ REE = 175 г/т, среднее) и характер распределения (La/Yb<sub>(n)</sub>=17.4, Eu\* = 0.78) лантаноидов в ММЕ, в целом, наиболее близки вмещающим кварцевым сиенитам и заметно отличается от пород первой фазы массива.

Распределения REE в базитовой части даек, сходно с ММЕ: характерны относительно высокое суммарное содержание REE (> 200 г/т Σ REE), дефицит HREE относительно LREE (La/Yb<sub>(n)</sub>=14-20), при этом следует отметить

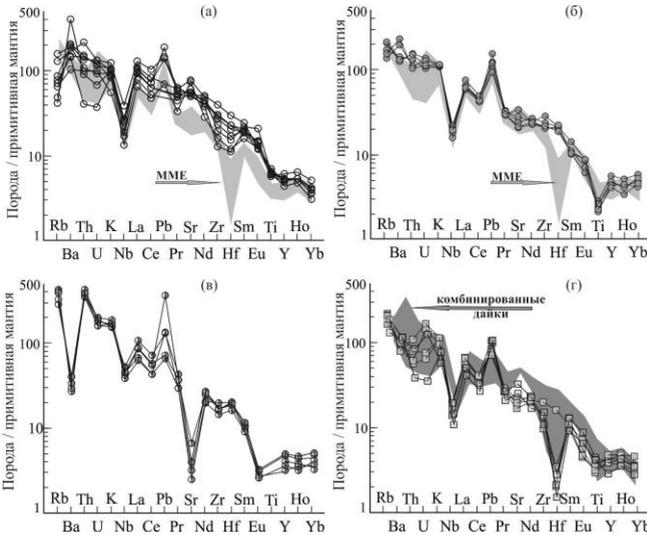


**Рис. 4. Распределение РЗЭ в породах Бургасского массива и базитах комбинированных даек:** (а) – монцонитоиды первой фазы; (б) – кварцевые сиениты второй фазы; (в) лейкограниты третьей фазы; (г) – мафические включения. Затененное поле на рисунках (а) и (б) – ММЕ, (г) – базиты комбинированных даек. Нормировано по [Sum,

McDonough, 1989].

отсутствие Eu аномалии, тогда как во включениях, как отмечалось выше, наблюдается четко выраженная отрицательная Eu аномалия, свидетельствующая, скорее всего, о фракционированном характере расплава. Породы Бургасского массива и базитовая составляющая комбинированных даек характеризуются обогащением LIL элементами относительно HFSE, при более высоких концентрациях LILE в монцонитоидах и

кварцевых сиенитах. Кроме того, все разновидности пород массива, включая ММЕ, имеют резкий Nb минимум и максимум по Pb, что вероятно связано с геохимическими особенностями источника.



**Рис. 5. Спайдер-диаграмма для пород Бургасского массива и базитов комбинированных даек:** (а) – монцитонитовиды первой фазы; (б) – кварцевые сиениты второй фазы; (в) – лейкограниты третьей фазы; (г) – мафические включения. Затененное поле на рисунках (а) и (б) – ММЕ, (г) – базиты комбинированных даек. Нормировано по [Palme, O'Neill, 2003].

Обращает внимание геохимическое сходство мафических включений и базитов комбинированных даек (рис. 5). В отличие от салических пород Бургасского массива, имеющих вероятно существенно коровый или смешанный источник, базиты комбинированных даек и вероятно включения, образовались за счет мантийного протолита. Соответственно Nb минимум и максимум по Pb, а также минимумы по Hf и в меньшей мере по Ti отражают геохимическую специфику мантийного источника и, возможно, некоторый вклад коровой контаминации. Геохимическое сходство базитов комбинированных даек и мафических включений Бургасского массива представляется не случайным. По нашему мнению это является доказательством того, что мафические включения также, как и трахизабальты комбинированных даек, имеют мантийное происхождение, причем образовались в сходных условиях из геохимически близкого (метасоматизированного) источника [Zhang et al., 2008].

Таким образом, петро-геохимические данные позволяют сделать следующие выводы.

1. Кварцевые сиениты второй фазы Бургасского массива не являются прямыми дифференциатами монцитонитовидов первой фазы.
2. Мафические включения в кварцевых сиенитах Бургасского массива по ряду ключевых параметров отличаются от монцитонитовидов первой интрузивной фазы и, соответственно, не могут быть их ксенолитами, что полностью согласуется с геологическими и минералого-петрографическими данными, приведенными выше.
3. Микроэлементный состав ММЕ весьма близок к вмещающим кварцевым сиенитам, что, по-видимому, связано с активным взаимодействием включений и вмещающих пород (более подробно этот вопрос рассматривается ниже).
4. Обнаруживается явное сходство (уровень концентраций, характерные аномалии) микроэлементного состава ММЕ и базитов комбинированных даек.

## ГЛАВА 5. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МАФИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И КОМБИНИРОВАННЫХ ДАЕК

Доказать магматическое происхождения включений в гранитоидах сложно. В плутонических сериях, в отличие от даек и вулканитов, не сохраняются наиболее характерные признаки сосуществования двух жидкостей, такие как зоны закалки или фестончатые края включений. Сами включения приобретают диоритовый, монцодиоритовый или монцонитовый состав. Поэтому, лишь совокупность всех данных может пролить свет на условия образования включений. В контексте данной работы наиболее важные значения имеют следующие характеристики включений:

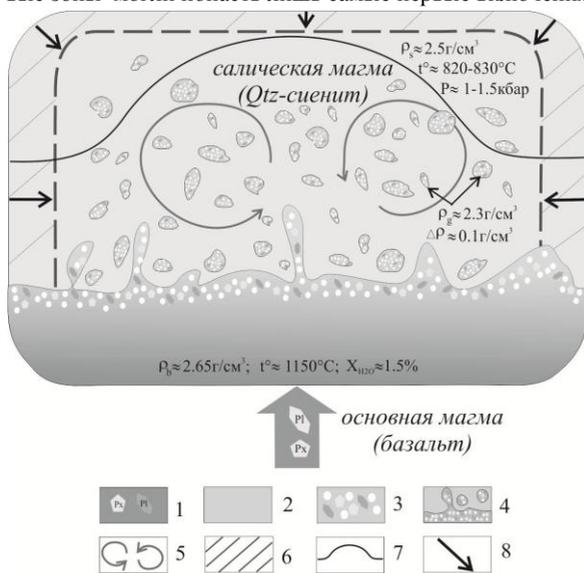
- Мафические включения в Бургасском массиве распространены на большей части его площади, при этом в краевых зонах редки или отсутствуют.
- В обрамлении массива отсутствуют породы близкие по составу к включениям. Более того, вмещающие образования на 90 % представлены предшествующими гранитоидами, мощность которых в рассматриваемом регионе составляет 7-10 км [Литвиновский и др., 1993; Турутанов, 2007], тогда как микроструктурные особенности включений свидетельствуют об их достаточно быстрой кристаллизации. Иными словами, включения не могли быть вынесены с больших глубин.
- Включения имеют округлую, иногда почти идеально сферическую форму, характерную для эмульсий.
- Зональность во включениях отсутствует, при этом диапазон вариаций состава достаточно широк.
- В некоторых случаях включения группируются в рои, причем, внутри роя включения различаются зернистостью, текстурно-структурными особенностями, составом.

По нашему мнению, совокупность всех этих признаков может быть реализована лишь в том случае, если включения попали в кварцевосиенитовый расплав в жидком состоянии. Исходя из приведенных выше фактических данных можно предположить следующий сценарий становления Бургасского плутона. Формирование массива началось с внедрения сравнительно небольшой порции трахибазальтового расплава, в результате внутрикамерной фракционной кристаллизации которого образовались породы первой интрузивной фазы. Вслед за этим, вероятно еще до охлаждения пород первой фазы (отсутствуют реакционные взаимоотношения) произошло внедрение кварцевосиенитового расплава. Становление плутона происходило в малоуглубинных условиях при давлении не более 1.5 кбар [Геря и др., 1997], температура расплава, рассчитанная на основе соотношения концентрации Zr и катионного отношения  $(Na+K+2Ca)/(Al \times Si)$  составляла ~ 820 - 830°C [Watson, Harrison, 1983], плотность ~ 2.4 – 2.5 г/см<sup>3</sup> [Биндеман, 1995; Плечов и др., 2008]). Сразу после образования кварцевосиенитовой магматической камеры произошло внедрение свежей порции трахибазальтового расплава, содержащего интрателлурические вкрапленники основного плагиоклаза и пироксена, доказательством чего является высокое давление образования последнего: ~ 8 кбар (Nimis, Ulmer, 1998). Плотность базальтового расплава принята 2.65 г/см<sup>3</sup>, температура 1150°C, содержание воды – 1.5 мас. %, что вполне реалистично для внутриплитных базальтов [Коваленко и др., 2007] и согласуется с большим количеством магматического амфибола и биотита во включениях. Исходя из общего объема включений, наблюдаемых на уровне современного эрозионного среза, а также литературных данных [Didier & Barbarin, 1991; Bindeman, 1993; Плечов и др.,

2008], доля базальтового расплава может варьировать от 1- 2 до 10 % от объема магматической (кварцевосиенитовой) камеры.

Базальтовый расплав занял придонную часть магматической камеры и на границе с салической магмой начался активный процесс химического взаимодействия (см. ниже), протекавшего на фоне фракционной кристаллизации базальтового расплава. При достижении насыщения остаточного расплава флюидом, что, согласно расчетам [Биндеман, 1995], соответствует 40 – 50 % кристаллизации, начинается выделение свободной газовой фазы, т.е. ретроградное «вскипание» расплава. Этот процесс возможен лишь в малоглубинных условиях - не более 1.5 кбар [Биндеман, 1995].

Одновременное действие трех процессов - фракционной кристаллизации (зональность роста в плагиоклазах), гибридации (неравновесная ассоциация минералов) и выделения свободной газовой фазы, привело к образованию гибридного субслоя кристаллизации, плотность которого, в определенный момент времени, становится меньше (~ на 0.1 г/см<sup>3</sup>) плотности перекрывающей салической магмы [Биндеман, 1995]. Инверсия плотности гибридного субслоя сопровождается образованием на его верхней границе диапиров, их всплыванием, разрушением и переносом отдельных фрагментов (ММЕ) конвективными потоками. Последнее доказывается наличием «роев», т.е. участков сегрегации включений. Мощность гибридного субслоя вероятно составляла около 0.5 м, что определяется максимальным размером включений [Плечов и др., 2008]. Кристаллизация магматической камеры в близповерхностных условиях происходила центростремитель- но, т.е. от контактов во внутрь, поэтому в краевые зоны могли попасть лишь самые первые включения.



**Рис. 6. Модель формирования мафических включений в кварцевых сиенитах Бургасского массива.**

1 – базальтовый расплав с интрателлурическими кристаллами плагиоклаза и клинопироксена; 2 – салический (кварцевосиенитовый) расплав; 3 – гибридный частично раскристаллизованный газонасыщенный расплав; 4 – диапиры гибридного расплава и мафические включения; 5 – конвективные течения; 6 – краевая зона интрузива; 7 – уровень эрозионного среза; 8 – направление кристаллизации.

$\rho_b$  – плотность базальтового и  $\rho_s$  салического (кварцевосиенитового) расплавов;  $\rho_g$  – плотность частично раскристаллизованного и насыщенного газовыми пузырьками гибридного расплава;  $\Delta\rho$  – разница в плотностях гибридного и кварцевосиенитового расплавов; объемные соотношения базитовой и салической составляющих вне масштаба, остальные пояснения в тексте.

Важно подчеркнуть, что всплывающие диапиры и продукты их разрушения – т.е. собственно ММЕ, уже имели не базальтовый, а монцонитоидный состав и, соответственно, более низкую температуру кристаллизации, не на много превышающую температуру кварцвосиенитового расплава. Этим объясняется хорошая раскристаллизованность включений, отсутствие характерных морфологических признаков существования двух жидкостей с разной температурой и плотностью, в частности, отсутствие зон закалки, как это наблюдается в комбинированных дайках и вулканогенных образованиях, где включения сохраняют свой исходный состав. Исходя из приведенных выше аргументов, мы предполагаем, что гибридизация базальтового расплава и формирование минеральных ассоциаций, наблюдаемых непосредственно в мафических включениях, началось сразу после внедрения базальтового расплава и формирования двухслойной магматической камеры. Разница ликвидусных температур базитового и кварцвосиенитового расплавов, вероятно, не многим превышала 300° С, а в приконтактной области была вероятно еще меньше, что способствовало интенсивному диффузионному обмену компонентами, направленному на выравнивание составов контактирующих магм. В результате, в пограничном слое кристаллизации битовнит-лабрадоровой плагиоклаз (интрателлурический) начал растворяться (коррозионные контуры), а затем, по мере охлаждения, на нем начала формироваться промежуточная андезитовая зона. Одновременно, уже из частично гибридного расплава, начали кристаллизоваться идиоморфные вкрапленники, зональность которых обусловлена, с одной стороны, гибридизацией (привнесом К, Na, Si и др. компонентов в расплав), а с другой – фракционной кристаллизацией. Инверсия плотности кристаллизующегося пограничного слоя, как отмечалось, может наступить при степени кристаллизации 40 – 50 % [Биндеман, 1995], однако эта величина сильно зависит от давления и исходного содержания воды в базальтовом расплаве.

Таким образом, на момент инверсии плотности и начала образования диапиров пограничный слой содержал вкрапленники плагиоклаза двух типов (с реликтовыми ядрами и с зональностью роста), вероятно большую часть магматической роговой обманки, гибридный обогащенный щелочами и кремнеземом остаточный расплав и свободную флюидную фазу.

Геохимический аспект гибридизации выражается, прежде всего, в существенном отклонении состава ММЕ от предполагаемого базальтового состава исходного для них расплава. Показателем степени гибридизации, по нашему мнению, может служить нормированное на кремнезем содержание оксида калия во включениях. По соотношению  $K_2O/SiO_2 - K_2O$  все ММЕ условно можно разделить на три группы в порядке возрастания калиевой щелочности и, соответственно, увеличения калий - кремниевого отношения. Возрастание калиевой щелочности, т.е. увеличение содержания щелочного полевого шпата и биотита, отражает возрастание степени воздействия кварцево-сиенитового расплава на исходный базальт. Для подтверждения этого предположения мы проанализировали средний состав выделенных групп ММЕ на средний состав кварцевых сиенитов. В результате установлено, что по мере возрастания калиевой щелочности (от первой группы к третьей), происходит сближение состава ММЕ и вмещающих кварцевых сиенитов. Важно подчеркнуть, что изменяются концентрации не только относительно мобильных компонентов, таких как щелочи, LILE, но и инертных, таких как Zr и Ti.

Очевидно, что процесс гибридизации идет в обе стороны - в мафические включения привносятся Si, щелочи и некоторые другие элементы, а из включений выносятся Ca, Fe, Mg, P, Ti – т.е. элементы «избыточные» по отношению к кварцевым

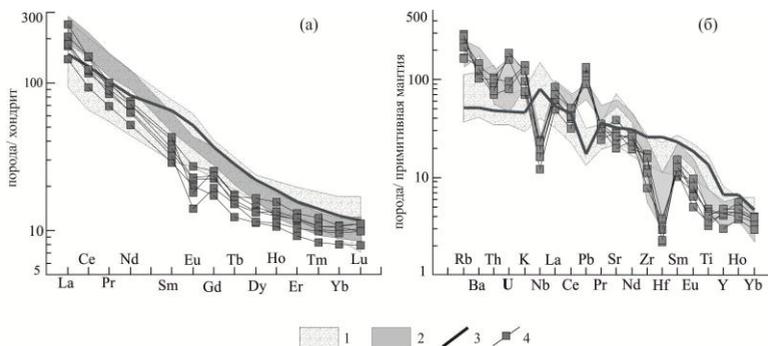
сиенитам. Этим, в частности, объясняется сходство редкоземельного спектра ММЕ и вмещающих кварцевых сиенитов, отмечаемое во многих плутонах [Didier & Barbarin, 1991; Collins et al., 2000; Arvin et al., 2004; Barbarin, 2005]. При этом следует иметь в виду, что объем салической магмы был несоизмеримо большим по сравнению с базитовой, причем не всей, а только находящейся в пределах пограничного слоя, суммарный объем которого вероятно коррелирует с объемом мафических включений (1 – 2 об. %).

Таким образом, ключевыми положениями рассматриваемой модели являются два фактора: а) реакционное взаимодействие (гибридизация) базальтового расплава с перекрывающим кварцевосиенитовым, что доказывается монцитонитовидным составом включений; б) кристаллизация гибридного расплава и его ретроградное «вскипание», т.е. выделение свободной газовой фазы, возможное лишь в малоглубинных условиях [Биндеман, 1995; Плечов и др., 2008].

Мафические включения в кварцевых сиенитах Бургасского плутона вероятно имели исходно базальтовый состав. В результате интенсивной гибридации – привноса кремния, калия и ряда других компонентов и выноса оснований, ММЕ приобрели монцитонитовидный состав, существенно отличающийся от исходного. Близкие по возрасту комбинированные дайки, образующие в Западном Забайкалье протяженный пояс и встречающиеся в непосредственной близости от Бургасского плутона, на 80 - 90 % сложены базитовым материалом, сохранившим свои геохимические характеристики. Пространственно-временная сопряженность рассматриваемых комбинированных даек и ММЕ Бургасского массива представляется не случайной. Судя по всему это генетически родственные образования, представляющие собой разные формы проявления процессов смешения базитовых и салических магм [Collins et al., 2000; Barbarin, 2005]. Исходя из этого, базиты комбинированных даек можно рассматривать как ключ к расшифровке геохимического типа базитовых магм, сформировавших ММЕ в Бургасском плутоне.

На рис. 7а. показано распределение REE в мафических включениях и базитах комбинированных даек. Из этого рисунка видно, что содержание и характер распределение REE в рассматриваемых образованиях достаточно близки. Для тех и других характерны высокие суммарные содержания REE ( $> 200$  г/т  $\sum$  REE), дефицит HREE относительно LREE (La/Yb(n)=14-20). Явное сходство между комбинированными дайками (базитовая составляющая) и ММЕ видно и на мультиэлементной диаграмме (рис. 7б). В обоих случаях наблюдается резкое обогащение LIL элементами относительно HFSE, резкая отрицательная аномалия по Nb, Hf, в меньшей мере Zr и Ti, положительная по Pb. Некоторые различия наблюдаются в более широких вариациях содержаний Ba и Hf в дайках, повышенном, относительно ММЕ, Sr в последних и напротив, несколько меньшем содержании свинца.

Очевидно, что полное сходство рассматриваемых образований невозможно, хотя бы в силу того, что включения интенсивно гибридизированы. Тем не менее, представленные данные приводят к выводу, что комбинированные дайки и мафические включения сформировались из геохимически однотипного исходного расплава мантийного происхождения, близкого по составу к базальтам OIB типа и базальтами кайнозойских внутриконтинентальных вулканических провинций [Farmer, 2003] (рис. 7), а их отличия от «эталонов» обусловлены особенностями состава мантийного источника.



**Рис. 7. Графики распределения REE (а) и спайдердиаграмма (б) для мафических включений, внутриплитных базальтов и комбинированных даек.**

1 – натриевые кайнозойские внутриконтинентальные базальты; 2 – базитовая составляющая позднепалеозойских комбинированных даек Западного Забайкалья; 3 – базальт ОИВ типа; 4 – мафические включения Бургасского массива. Нормировано: (а) по [Sum, McDonough, 1989]; (б) по [Palme, O'Neill, 2003].

Позднепалеозойские гранитоиды Западного Забайкалья, за исключением гранитов баргузинского комплекса, обнаруживают «смешенные» изотопные характеристики [Litvinovsky et al., 2011], указывающие на присутствие в их составе как корового, так и мантийного компонентов. Смешенные изотопные «метки» согласуются с наличием в составе таких гранитоидов мафических включений и комбинированных даек. Для выяснения характера взаимодействия и объемных соотношений мантийных и коровых магм при формировании позднепалеозойских гранитоидов, нами проведены масс-балансовые расчеты по моделям смешения и фракционной кристаллизации, на примере низкокремниевых (кварцевые сиениты-кварцевые монцониты) гранитоидов чивыркуйского и лейкогранитов зазинского комплексов, соответственно.

Для модели смешения в качестве исходных базитов принят средний состав габбро первой фазы Бургасского плутона, в качестве салического компонента смешения принят средний состав гранитов баргузинского комплекса. Масс-балансовые расчеты показывают, что кварцмонцит-кварцсиенитовый расплав (средний состав кварцевых сиенитов и кварцевых монцонитов чивыркуйского комплекса, согласно [Цыганков и др., 2010]) может быть получен путем смешения указанных исходных компонентов в пропорции примерно 1:3, при  $R$  (сумма квадратов отклонений) = 1.19.

Данные по зазинскому комплексу, приведенные в [Litvinovsky et al., 2011], показывают, что образование типоморфных лейкогранитов может происходить путем фракционной кристаллизации гибридной магмы, полученной для чивыркуйского комплекса. При этом фракционирующими фазами (%) являются  $Pl_{40-24.1}$  Amp-2.4, Bt-5.2 и аксессуарные минералы (Fe-Ti-1.8, Ap-0.4), а доля остаточного расплава составляет 66% от исходного.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в ходе выполнения диссертационной работы исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Меланократовые включения в кварцевых сиенитах по составу близки к монцитоидам первой фазы Бургасского массива, однако не являются их ксенолитами, а кристаллизовались из самостоятельной порции диспергированного гибридного базальтового расплава. Главным свидетельством базальтовой природы включений является реликтовый парагенезис кальциевого плагиоклаза и моноклинного пироксена, а также, магматические долеритоподобные или микрогаббровые структуры, сохраняющиеся во включениях.
2. Наблюдаемый монцитонитоидный состав включений, обусловлен процессами гибридации, петрографическим выражением которых являются кварц, калиевый полевой шпат и кислый плагиоклаз. Их образование связано с привнесом кремния, калия и ряда других элементов из вмещающего расплава, начавшимся на магматической стадии (*mixing*) и закончившимся, вероятно, на стадии постмагматического преобразования пород.
3. Образование ММЕ и комбинированных даек представляет собой разные стадии или разные реологические условия проявления одного и того же процесса смешения магм, протекавшего при разном объемном соотношении базитовой и салической составляющих. В обоих случаях базиты испытали воздействие салического расплава, однако в дайках это воздействие было минимальным, что отразилось лишь в некоторых минералого-петрографических особенностях базитовой части даек, но не привело к существенному изменению их макро- и микрокомпонентного состава, тогда как в ММЕ сохраняются лишь реликты исходных минеральных ассоциации. Выявленное сходство состава (минерального, химического) базитовой части даек и меланократовых включений приводит к выводу о сходстве образовавших их исходных расплавов.
4. Исходный состав ММЕ и базитов комбинированных даек характеризуется повышенной калиевой щелочностью и по составу сходен с базальтами ОІВ типа, отличаясь от последних некоторыми параметрами, что, вероятно, связано с геохимическими особенностями мантийного источника.
5. В позднепалеозойских гранитоидах Западного Забайкалья четко проявлены разные типы взаимодействия мантийных и коровых магм: а) *mingling* (механическое смешение магм) - наиболее ярким проявлением этого процесса являются ММЕ в гранитоидах и комбинированные дайки. В этом случае вещественный вклад базитовых магм в состав гранитоидов был минимальным, однако сами базиты, в случае ММЕ, были существенно преобразованы за счет химического взаимодействия с салическим расплавом; б) *mixing* (химическое смешение) – выражается, главным образом, в промежуточных изотопных характеристиках гранитоидов и наиболее ярко проявлен в породах чивыркуйского комплекса; в) *фракционная кристаллизация* (гибридных магм) - характерна для зазинских гранитоидов и также выражается в промежуточных изотопных характеристиках.

#### Список основных публикаций по теме диссертации:

1. **Патрушева Г.Н., Цыганков А.А.** Минералогические особенности меланократовых включений в кварцевых сиенитах Бургасского массива (Западное Забайкалье) // Проблемы геологии, минеральных ресурсов и геоэкологии Западного Забайкалья. М-лы Научно-практической конференции. Улан-Удэ, 2007, с.56-58.

2. Цыганков А.А., **Патрушева Г.Н.** Меланократовые включения в кварцевых сиенитах Бургасской интрузии: состав, условия образования // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Вып. 6. Томск: Изд-во ТГУ, 2007, с.153-159.
3. **Патрушева Г.Н.**, Цыганков А.А. Минералогические особенности мафических включений и комбинированных даек в гранитоидах Ангаро-Витимского батолита // XIII международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова. Томск 2009, с. 89-91.
4. **Патрушева Г.Н.**, Цыганков А.А. Минералого-геохимические особенности мафических включений и комбинированных даек в гранитоидах Ангаро-Витимского батолита // XXIII Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск, 2009, с. 156-158.
5. **Патрушева Г.Н.**, Цыганков А.А. Комбинированные дайки и мафические включения в гранитоидах Западного Забайкалья: особенности состава и происхождения // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Екатеринбург, 2009, том 2, ст. 97-100.
6. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Полевые шпаты меланократовых включений и вмещающих пород кварцевосиенитового Бургасского массива (Западное Забайкалье) // Всероссийская петрографическая конференция «Петрология магматических и метаморфических комплексов». Вып. 7. Томск: ЦНТИ, 2009, с. 24-30.
7. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Минералого-геохимические особенности меланократовых включений в кварцевых сиенитах Бургасского массива (Западное Забайкалье) // **Вестник БНЦ СО РАН**, 2010 с. 53-62.
8. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Комбинированные дайки Западного Забайкалья: состав, условия образования // Международная конференция, посвященная 90-летию Ильменского государственного заповедника, 90-летию со дня рождения академика П.Л. Горчаковского и 180-летию со дня рождения академика П.В. Еремеева. Наука, природа и общества. Материалы конференции. Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 2010, с.4-8.
9. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Мафические включения в кварцевых сиенитах Западного Забайкалья - свидетельство смешения мантийных и коровых магм // XI всероссийское петрографическое совещание «Магматизм и метаморфизм в истории земли». Екатеринбург, том 1: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2010, с.90-91.
10. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Мантийный магматизм в гранитоидном петрогенезисе Западного Забайкалья // Международная конференция, посвященная 80-летию основания в Томском политехническом университете первой в азиатской части России кафедры «Разведочное дело». Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010, с. 31-35.
11. **Бурмакина Г.Н.** Минералогические свидетельства смешения контрастных магм (комбинированные дайки и меланократовые включения, Западное Забайкалье) // V Сибирская международная конференция молодых ученых по наукам о земле. Новосибирск, 2010, с. 41-43.
12. **Бурмакина Г.Н.** Свидетельства участия мантийных магм в формировании гранитоидов Западного Забайкалья// Всероссийская молодежная конференция «Геология Западного Забайкалья», Улан-Удэ, 2011, с. 11-12.
13. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Смешение магм в постколлизийных гранитоидах Западного Забайкалья // Геодинамическая эволюция литосферы централь-

- но-азиатского подвижного пояса: от океана к континенту, ИЗК СО РАН, Иркутск 2011, с.43-46.
14. Цыганков А.А., Удоратина О.В., **Бурмакина Г.Н.**, Гроув М. Новые результаты U-Pb датирования цирконов и проблема длительности формирования Ангаро-Витимского батолита // **Доклады академии наук**, 2012, т. 447, № 2, с. 204-209.
  15. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Комбинированные дайки в гранитоидах Западного Забайкалья – свидетельство смешения контрастных по составу магм // Ультробазит-базитовые комплексы складчатых областей и их минерагения. М-лы конф. Улан-Удэ, ИД Экос, 2012, с. 30-33.
  16. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Комбинированные дайки в гранитоидах Западного Забайкалья: геологическое строение, состав, петрогенезис // Современные проблемы магматизма и метаморфизма. М-лы конф. Санкт-Петербург, 2012, с. 91-94.
  17. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А., Хромов А.А. Меланократовые включения в позднепалеозойских гранитоидах Западного Забайкалья // Современные проблемы геохимии, Иркутск, 2012, с. 30-33.
  18. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Смешение магм и гранитоидный петрогенезис (Западное Забайкалье) // Минералогия Северо-Восточной Азии. М-лы III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры геологии Бурятского госуниверситета, Улан-Удэ, 2012, с. 35-39.
  19. **Бурмакина Г.Н.**, Цыганков А.А. Мафические включения в позднепалеозойских гранитоидах Западного Забайкалья (Бургасский кварцевосиенитовый массив): состав, петрогенезис // **Петрология**, 2013, т. 21, № 3, с. 309-334.