

*На правах рукописи*



**СОТНИКОВА Ирина Александровна**

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД  
СЕВЕРНОГО ПРИБАЙКАЛЯ**

Специальность 25.00.09 – геохимия,  
геохимические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск - 2009

Работа выполнена в учреждении Российской академии наук Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук  
Владыкин Николай Васильевич (ИГХ СО РАН)

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук  
Конев Алексей Андрианович (ИЗК СО РАН)

кандидат геолого-минералогических наук  
Ефремов Сергей Васильевич (ИГХ СО РАН)

Ведущая организация: Байкальский филиал  
ГС УГП «Урангеологоразведка»

Защита диссертации состоится 07 декабря 2009 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН.

Автореферат разослан « 28 » октября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.г.-м.н.



Королева Г.П.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

Определяется тем, что с Бурпалинским и Акитским массивами связаны уникальные редкометальные месторождения Ta, Nb, Zr, Y, TR без которых не может обойтись современная электронная и космическая промышленность. Поэтому изучение закономерности их формирования поможет разработать критерии поисков месторождений полезного сырья.

### **Цели и задачи работы.**

1. Уточнение схемы формирования пород и возрастов массивов. Построение петрохимических и геохимических трендов составов пород массива, выявление эволюции щелочной магмы при дифференциации от ранних пород к поздним, которая приводит к накоплению редких элементов.

2. Исследование химизма породообразующих минералов: пироксенов, амфиболов и слюд, и на основе закономерностей изменения их состава (от ранних пород к поздним), уточнение редкометальной эволюции первичной магмы.

3. Исследование редких разновидностей слюд в необычных карбонатитах Акитского массива и подтверждение их карбонатитовой природы.

4. Выявление структурных закономерностей цирконосиликатов Бурпалинского массива и их эволюции при изменении химизма в расплавах.

5. Выяснение геохимических и генетических особенностей изученных редкометальных пород и определение источников их магм.

### **Фактический материал и методы исследований.**

Материал для изучения Акитского массива был собран автором в 2001 г. Изучение Бурпалинского массива базировалось на коллекции образцов, собранной Н.В. Владыкиным в 1991г. Исследования проводились в рамках планов НИР института, проектов РФФИ, интеграционного проекта СО РАН, одним из исполнителей которых являлся автор диссертации. Изучено 200 шлифов пород, проведен химический анализ более 300 образцов пород, более 200 силикатных и микронзондовых анализов породообразующих минералов и 50 микронзондовых анализов цирконосиликатов и акцессорных минералов. Получены геохимические данные более 300 количественных эмиссионно-спектральных определений редких элементов в породах массива и 30 определений редких элементов методом ICP-MS и изотопные данные (Sr-Nd): 2 проб Акитского и 4 проб Бурпалинского массива. Проведены определения возраста Бурпалинского массива по цирконам U-Pb методом и Акитского массива Rb-Sr методом. Аналитические результаты обрабатывались петрохимическими, геохимическими методами с помощью ЭВМ.

### **Научная новизна.**

Данные массивы детально исследовались в 60-е гг. XX века. Нами предложена новая схема формирования массивов, которая подтверждена петрохимическими методами исследования пород и изучением химизма породообразующих минералов. Получены новые современные аналитические данные о петрохимических и геохимических особенностях пород массивов и редкометальных пегматитах. Впервые детально исследованы составы породообразующих минералов в интрузивных породах, пегматитах и карбонатитах. Детально изучены Li-Mg-F слюды – тайниолиты. Получены новые данные о цирконосиликатах Бурпалинского массива, на основании которых произведена их систематизация по кристаллохимическим особенностям и выявлена связь их образования с химизмом пород. Получены первые данные  $t^0$  образования апатит-флюоритовых пород методом термобарогеохи-

мии. Получен возраст пород Бурпалинского массива по цирконам (U-Pb методом), впервые получены данные по изотопии Sr-Nd и определен тип мантийного источника обоих массивов.

#### **Практическая значимость работы.**

1) Дана детальная характеристика вещественного состава: как самих пород массива, так и редкометальных руд, имеющих большое практическое применение.

2) Выявлены генетические условия образования пород и минералов массивов и типы их мантийных источников, что можно использовать в прогнозировании поисков подобных месторождений.

#### **Защищаемые положения.**

1. По геологическим и петрохимическим данным кристаллизация пород Бурпалинского и Акитского массивов идет по следующей схеме: шонкиниты → Не-сиениты → щелочные сиениты → Qu-сиениты → сиенитовые пегматиты → апатит-флюоритовые породы → щелочные граниты → карбонатиты.

Возраст сиенитов Акитского массива - 200 млн. лет, карбонатитов - 186 млн. лет, а пегматитов Бурпалинского массива - 287 млн. лет.

2. В процессе дифференциации щелочной магмы в породообразующих пироксенах и амфиболах идет возрастание Na-Fe и Fe составляющих относительно Mg в слюдах, а в карбонатитах образуется Li-F-Mg слюда – тайниолит.

3. Редкометальная специфика щелочных пегматитов массива Бурпала реализуется образованием специфичных Zr-силикатов, повышение кремнекислотности которых согласуется в них с образованием ряда  $[SiO_4] \rightarrow [Si_2O_7] \rightarrow [Si_3O_9] \rightarrow [Si_4O_{11}] \rightarrow [Si_6O_{15}]$  и с увеличением кремнекислотности пород.

4. Поведение редких элементов в породах массивов закономерно меняется от ранних пород к поздним. В пегматитах Бурпалинского массива 6 различных типов спектров TR определяются парагенезисами редкометальных минералов.

5. По геологическим и термобарогеохимическим данным силикатные породы массивов образовались из магматического расплава, а апатит-флюоритовые породы - из остаточного флюид-расплава при  $T=900-560^{\circ}C$ . По изотопным данным Nd-Sr и Pb их магмы образовались из обогащенного мантийного источника EM-2.

#### **Апробация работы и основные публикации.**

Основные научные результаты представлялись на Молодежных научных конференциях: Современные проблемы геохимии (Иркутск 2002, 2006, 2007, 2009), Международной конференции по наукам о Земле (Новосибирск 2006), Международном семинаре «Глубинный магматизм, его источники и плюмы» (Иркутск 2006), Всероссийском семинаре «Геохимия магматических пород» (г. С-Петербург 2008), XXIII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск 2009) и т.д. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 2 статьи в рецензируемых российских журналах.

**Объем и структура работы.** Работа общим объемом 125 страниц состоит из введения, шести глав, заключения, и списка литературы из 60 наименований. Материал сопровождается 64 рисунками и 22 таблицами.

**Благодарности.** Исследования проводились в Институте геохимии им. А.П. Виноградова при всесторонней поддержке научного руководителя д.г.-м.н. Н.В. Владыкина. За ценные советы и всестороннюю помощь автор благодарит Т.С. Торбееву, к.г.-м.н. А.Б. Перепелова (ИГХ СО РАН), к.г.-м.н. Г.С. Риппа (ГИ СО РАН, г. Улан-Уде), коллектив Лаборатории щелочных пород и аналитиков: Финкельштейна А.Л.,

Матвееву Л.Н, Митрофанову А.Ю. (ИГХ СО РАН). Автор выражает искреннюю благодарность Котову А.Б (ИГиГД РАН), Прокофьеву В.Ю. (ИГЕМ РАН).

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ лаборатории Геохимии щелочных пород Института геохимии СО РАН, а также при финансовой поддержке проектов РФФИ.

## **Глава 1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ МАССИВОВ БУРПАЛА И АКИТ**

В 30-х гг. XX века впервые Т.И. Дитмаром были отмечены выходы щелочных пород в Сев. Прибайкалье. С 1957 по 1965 г. на этой территории работал сотрудник ВСЕГЕИ А.Я. Жидков. Он впервые выделил Северо-Байкальскую щелочную провинцию и открыл массив Бурпала.

С 1961 г. на территории Сев. Прибайкалья во внутриконтинентальной рифтовой зоне разломов сотрудники ВСЕГЕИ, БГУ, ВИМС, выделили интрузии: Аakit, Бурпала, Гоуджекит, Сынныр, Якша, Манюкан, Хороб, Гициндра. Особенностью провинции была ее К-специализация, но каждый массив имел свои особенности.

Бурпалинский массив является интрузией центрального типа. Кроме А.Я. Жидкова (1960-1965), на данном массиве работала большая группа исследователей: А.С. Пак (БГУ, 1961), А.С. Портнов (ВИМС, 1963-1965), А.А. Ганзеев, А.П. Хомяков (ИМГРЭ, 1964-1965), Э.А. Багдасаров (ВСЕГЕИ, 1965), Г.В. Андреев (ИГ 1963), Л.И. Панина (1964), Владыкин Н.В. (ИГХ, 1965-1991). Портнов А.С. открыл в пегматитах несколько новых минералов. По А.Я. Жидкову Бурпалинская интрузия была сформирована в три последовательные фазы. Первая - внедрились нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты, вторая - дайки нефелиновых сиенитов и метасоматитов - пегматитов (метасоматоз рассматривается как самостоятельный этап или субфаза), третья - жильные граниты. Наиболее поздними образованиями массива считалась гидротермальная апатит-флюоритовая жила.

Акитский массив изучался А.И.Залуцким, И.Ф.Баиновым А.Г. и сотрудниками ГИ СО РАН (Г.С.Рипп и др.). По И.Ф.Баинову массив сформировался в три фазы - щелочные и кварцевые сиениты - щелочные граниты - нефелиновые сиениты. Если эти фазы, относить к комагматам, то необъяснимым остается нарушение известной последовательности кристаллизационной дифференциации таких пород.

## **Глава 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ПОРОД.**

### **Акитский массив.**

Акитский щелочной массив округлой формы ( $4.5\text{ км}^2$ ) (рис. 1), расположен в междуречье Кичеры и Верхней Ангары. Вмещающие породы представлены нижне-PZ гранитами. Возраст массива, определенный Rb-Sr методом, составляет  $200 \pm 2$  млн. лет, а возраст редкометальной минерализации в карбонатных жилах Акитского массива равен  $186 \pm 5$  млн. лет (Punn и др 2006).

Интрузив сложен в основном пироксен-амфиболовыми щелочными и кварцевыми сиенитами. Щелочные сиениты - среднезернистые породы, состоящие из микроклина, альбита, гастингсита, авгита и биотита. В центральной части массива наблюдается тело кварцевых сиенитов. Более поздними являются дайки щелочных гранитов. Нефелиновые сиениты слагают дайкообразные тела мощностью до 15 м. и протяженностью до 100 м. во вмещающих древних гранитах. Они сложены: микроклином, нефелином, эгирин-авгитом и биотитом. С массивом связано 5 линейных зон микроклинитов, альбититов и флюорит-карбонатных жил с тайниолитом

(карбонатитов), рудоносных на TR и Y. Нами предложена новая схема магматизма массива: Ne-сиениты→щелочные сиениты→Qu сиениты→щелочные граниты. В этом ряду происходит постепенное увеличение SiO<sub>2</sub> пород, которое является индексом дифференциации для данной серии пород.

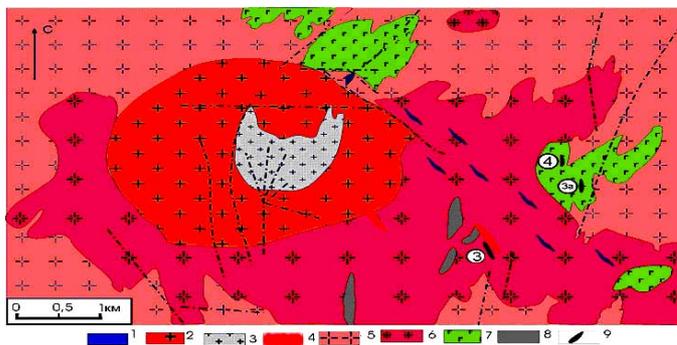


Рис. 1. Схема геологического строения Акитского массива.

1 – жильные нефелиновые сиениты, 2 – щелочные сиениты, 3 – кварцевые сиениты, 4 – жильные щелочные граниты. Вмещающие породы: 5 – лейкократовые граниты, 6 – крупнозернистые граниты, 7 – диориты, 8 – сланцы и амфиболиты, 9 – рудные зоны и их номера.

Завершающими являются редкометальные кальцит-анкеритовые жилы (карбонатиты) и гидротермалиты. Иттриевый характер TR в них подтверждает их генетическую связь со щелочными гранитами, для которых характерна Y-минерализация.

### Бурпалинский массив.

Массив Бурпала - интрузия центрального типа (250 км<sup>2</sup>), возрастом 287 млн. лет, относится к уникальным редкометальным щелочным объектам. Нами предложена новая схема массива: шонкиниты→нефелиновые сиениты→щелочные сиениты→кварцевые сиениты→жильные породы: мариуполиты, редкометальные пегматиты, щелочные граниты, апатит-флюоритовые породы, карбонатиты. Вмещающими породами массива являются песчаники и алевролиты.

Наиболее ранними породами массива являются дайки шонкинитов, встречающиеся во вмещающих породах ЮЗ части массива. Они сложены K-полевым шпатом и меланократовыми минералами (20-40%): пироксеном, слюдой и гранатом. Мощность даек 1 - 5 м. и протяженность до 100 м.

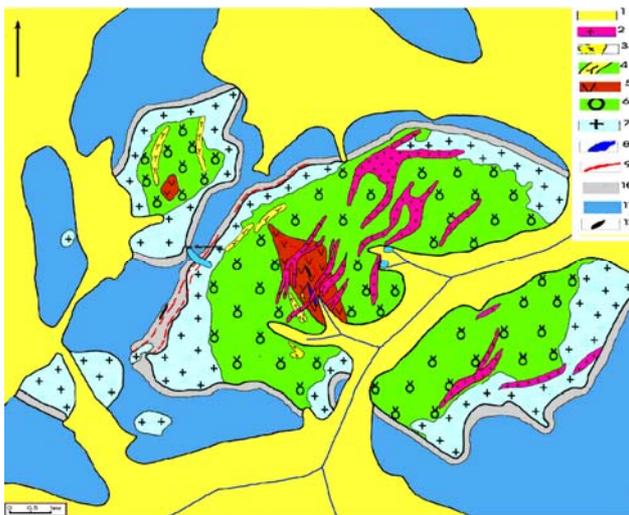


Рис. 2. Схема геологического строения Бурпалинского массива.

1 - четвертичные отложения, 2 - дайки аляскитов, 3 - мариуполиты, 4 - фойяиты, 5 - нефелиновые сиениты, 6 - пуласкиты, 7 - кварцевые сиениты, 8 - апатит-флюоритовая жила, 9 - пегматиты, 10 - роговики, 11 - сланцы, 12 - карбонатиты.

Главная фаза представлена среднезернистыми пуласкитами. Они сложены пертитовым K-Na полевым шпатом, нефелином (5-8%), амфиболом и пироксеном и акцессорными - цирконом, сфеном, апатитом и магнетитом. В эндоконтактных частях массива пуласкиты переходят в кварцевые сиениты. Они сложены микроклин-пертитом, кварцем (5-10%), амфиболом, пироксеном, слюдой и акцессорными - апатитом, магнетитом, цирконом и сфеном. Породы жильной фации: нефелиновые и щелочные сиениты, редкометальные щелочно-полевошпатовые пегматиты, «нефелин-содалитовые мариуполиты», аляскиты и щелочные граниты. Особое место занимает крупная дайка апатит-флюоритовых пород.

Редкометалльные пегматиты внедрились по разломам приконтактной ЮЗ и центральной частях массива. Они состоят из микроклина, альбита, пироксенов, амфиболов и редкометалльных минералов. Zr-силикаты (циркон, эвдиалит, ловенит, Ti-ловенит, велерит, бурпалит, сейдозерит, Са-сейдозерит, розенбушит, власовит, катаплеит, Са-катаплеит, эльпидит); минералы Ti (сфен, астрофиллит, рамзаит, Mn-нептунит, бафертисит, чевкинит, Mn-ильменит, пирофанит, Sr-перьерит, ландацит, рутил, анатаз, брукит); минералы TR (лопарит, металопарит, бритолит, ринколит, меланоцерит, бастнезит, паризит, анкилит, монацит, TR-апатит); другие редкие минералы (лейкофан, гамбергит, пирохлор, тайниолит, бревстерит). В некоторых участках на контакте редкометалльных пегматитов с алевролитами образуются фениты, мощностью до 5-10 м. В фенитах редкометалльная минерализация представлена меланоцеритом, ринколитом, цирконом.

Апатит-флюоритовое жильное тело, мощностью 10-50 м. и протяженностью 2-3 км., расположено в пуласситах центральной части массива. Оно сложено апатитом (10-30%), флюоритом (20-70%), кроме того, встречаются: магнетит (1-10%), биотит (3-15%), пироксен (2-10%), нефелин (1-5%). Контакты с вмещающими пуласситами - резкие. Термобарогеохимические исследования, проведенные В.Ю. Прокофьевым (ИГЕМ РАН) на нашем материале, показали высокие температуры образования минералов дайки (флюорит -  $>560^{\circ}\text{C}$  и апатит -  $>800^{\circ}\text{C}$ ). Нами встречены две карбонатные жилы, которые по геохимическим признакам можно отнести к карбонатитам. Одна жила во вмещающих породах и сложена кальцитом, кварцем (20%) и пиритом (5%). Вторая жила прорывает нефелиновые сиениты центральной части массива, мощность ее 20-30 см. и протяженность 30 м., сложена кальцитом, микроклином (30%) и Sr-цеолитом-бревстеритом (1-3%).

Аляскитовые и щелочные граниты образуют многочисленные дайки, в центральной части массива. Мощность их от 1 м. до 100 м. и протяженность от 200 м до 1-5 км. Они занимают 10% от площади массива. Аляскиты сложены кварцем, микроклин-пертитом, а щелочные граниты - кварцем, микроклином, арфведсонитом и эгирином. Обнаружен пегматит с эльпидитом, Pb-бетафитом, бафертиситом, торитом, астрофиллитом, нептунитом, криолитом (*Ефимов, Ганзеев, 1972*)

#### **Данные возраста**

Возраст оруденения Акитского массива, определенный Rb/Sr изохронным методом равен  $186 \pm 5$  млн. лет, а сиенитов 200 млн. лет (*Punn и др. 2006.*).

Возраст Бурпалинского массива оценивался А.Я. Жидковым в 400 млн. лет. На выделенных нами цирконах А.А.Котовым (ИГиДГ, Санкт-Петербург) получено значение возраста  $287 \pm 1$  млн. лет, что свидетельствует о едином возрастном цикле магматизма для Сыннырского и Бурпалинского массива.

### **Глава 3. ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД.**

#### **Акитский массив.**

Из диаграммы  $\text{SiO}_2$ - $[\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}]$  видно, что составы пород укладываются в границы от основных до кислых пород. По химическому составу выделяются 4 разновидности пород: Ne-сиениты, щелочные сиениты, Qu-сиениты и щелочные граниты. В этом генетическом ряду происходит постепенное увеличение кремнекислотности пород, которая является индексом дифференциации этой серии.

Закономерно уменьшаются содержания Al, а так же Ba и Sr и повышается Кагп. Наблюдаются единые тренды составов магматических пород массива, а карбонатиты и гидротермалиты естественно имеют свой тренд составов. Петрохимические данные подтверждают образование пород из единой магмы.

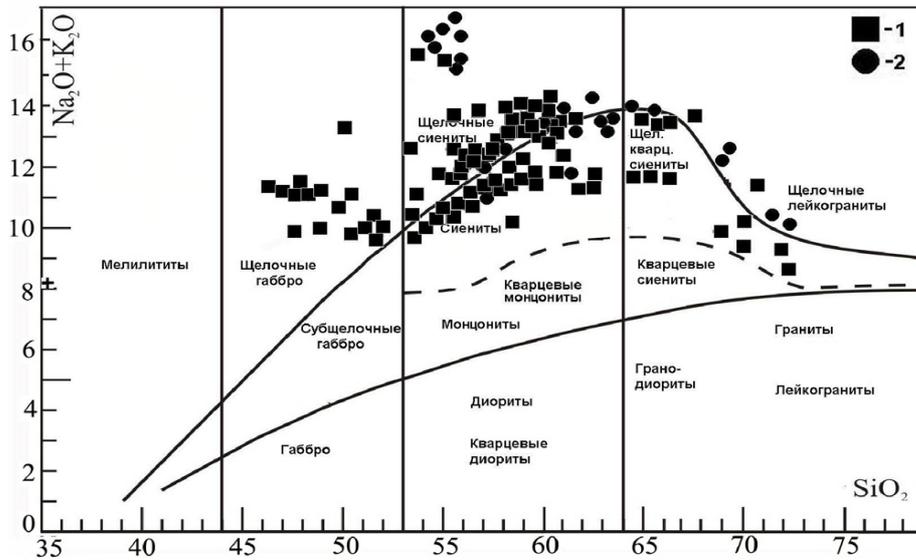


Рис.3. Диаграмма  $\text{SiO}_2\text{-}[\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}]$  для магматических пород Акитского (2) и Бурпалинского массивов (1).

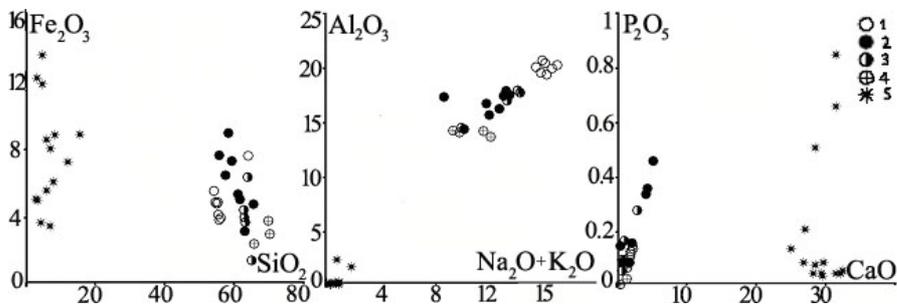


Рис. 4. Парные корреляции пород Акитского массива.: 1- нефелиновые сиениты, 2- щелочные сиениты, 3- кварцевые сиениты, 4- щелочные граниты, 5- карбонатиты.

### 3.2 Бурпалинский массив.

На диаграмме  $\text{SiO}_2\text{-}[\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}]$  (рис. 3) видно, что абсолютное большинство пород располагается в поле типично щелочных и субщелочных образований. На петрохимических диаграммах корреляций петрогенных элементов породы массива образуют единый тренд, говорящий об их генетической общности (рис. 5). Из-за вариаций мелано- и лейкократовых полос в пегматитах, связанных с процессами расслоения щелочной магмы, точки их составов образуют широкое поле, которое вписывается в основной тренд.

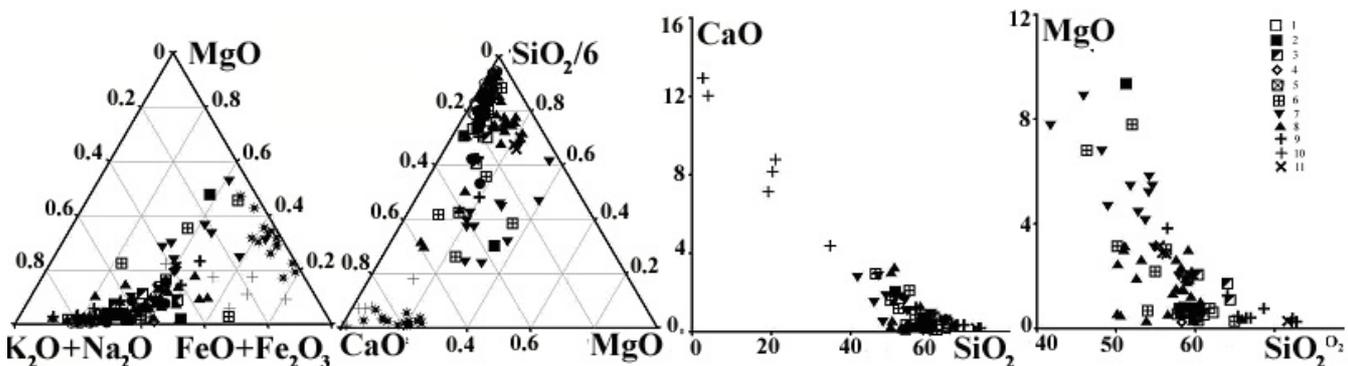


Рис. 5. Диаграммы парных и тройных корреляций петрогенных элементов в породах Бурпалинского массива: 1 - нефелиновые сиениты, 2 - пуласкиты ГИФ, 3 - кварцевые сиениты, 4 - мариуполиты, 5 - пегматиты центра массива, 6 - нефелиновые сиениты жильные, 7 - дайки шонкинитов, 8 - редкометальные пегматиты, 9 - аляскиты и щелочные граниты, 10 - апатит-флюоритовые породы, 11 - фениты.

## Глава 4. МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАССИВОВ АКИТ И БУРПАЛА

### Химический состав породообразующих минералов щелочных пород.

**Слюды Аakitского массива.** В щелочных и кварцевых сиенитах слюды по составу отвечают Fe-биотитам (аннитам), в нефелиновых сиенитах состав слюд - на границе Mg-биотитов и Fe-флогопитов, что согласуется с химическим составом пород, из магмы которых они образовались. В сиенитах - слюды флогопит-биотитового ряда (рис. 6), в которых от ранних пород к поздним идет увеличение Fe-составляющей. Составы слюд укладываются в единый тренд, что свидетельствует о генетической общности пород массива. В жильных карбонатитах встречена редкая разновидность слюд – тайниолит. Тайниолит максимально F-Li слюда с тетраэдрической позицией, полностью заполненной Si, а позицией дополнительных анионов - F. Тайниолиты Аakitского массива кристаллизуются в кальцит-анкеритовых карбонатитах. Интересен генетический аспект кристаллизации тайниолитов. Mg и Li – антиподы в геохимическом процессе. Содержание Mg уменьшается, а содержание Li наоборот увеличивается от ранних пород к поздним, поэтому очень редко встречаются условия, когда содержания этих элементов достаточно для образования тайниолита. Чтобы в тетраэдрической позиции отсутствовал Al, необходим высокий Кагп и повышенная кремнекислотность.

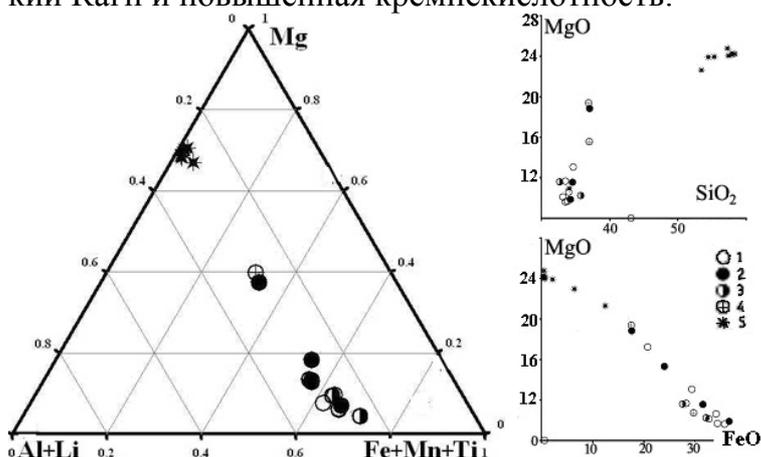


Рис.6. Состав слюд массива Аakit в Сев. Прибайкалье: 1- нефелиновые сиениты, 2- щелочные сиениты, 3- кварцевые сиениты, 4- щелочные граниты, 5 - карбонатиты.

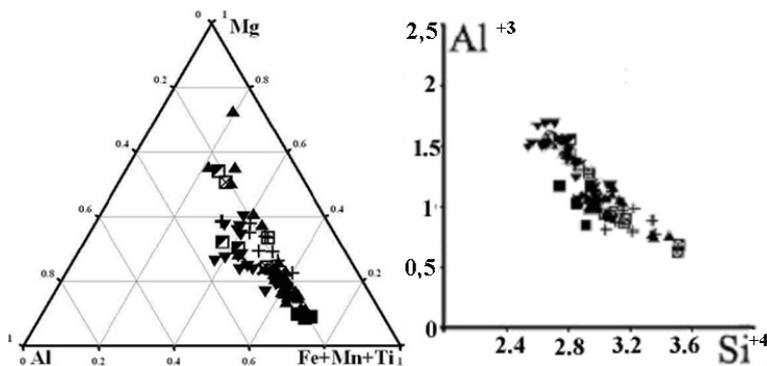
Тайниолит кристаллизуется обычно в щелочносиенитовых пегматитах, содержащих Mg, где так же локально накапливается Li и

F и в обогащенных Li карбонатитах, связанных со щелочными породами.

### Слюды Бурпалинского массива.

Слюды являются типоморфными минералами силикатных щелочных пород

Бурпалинского массива. Рис.7. Корреляционные зависимости слюд Бурпалы. Усл. обозначения, как на рис. 5. На диаграмме (рис. 7) слюды образуют единый тренд составов: от флогопитов до аннитов, свидетельствующий об их генетической общности и образовании в процессе магматической дифференциации пород. Слюды Аakitского массива отличаются от слюд Бурпалинского массива более железистым составом, что связано с наличием большего количества более кремнекислых пород в этом массиве. Как в Аakitском массиве, так и в Бурпалинском массиве наблюдаются слюды с высокими содержаниями титана - в Аakitском массиве до 4-5 % и в Бурпалинском массиве до 7-9 %.



Бурпалинского массива.

Рис.7. Корреляционные зависимости слюд Бурпалы.

Усл. обозначения, как на рис. 5.

На диаграмме (рис. 7) слюды образуют единый тренд составов:

от флогопитов до аннитов, свидетельствующий об их генетической общности и

образовании в процессе магматической дифференциации пород.

Слюды Аakitского массива отличаются от слюд Бурпалинского массива более железистым составом, что связано с наличием большего количества более кремнекислых пород в этом массиве. Как в Аakitском массиве, так и в Бурпалинском массиве наблюдаются слюды с высокими содержаниями титана - в Аakitском массиве до 4-5 % и в Бурпалинском массиве до 7-9 %.

### Амфиболы.

Амфиболы являются типоморфными минералами изученных массивов. На классификационной диаграмме (Коваленко и др., 1977) изученные амфиболы (рис. 8) относятся к щелочным и субщелочным разновидностям.

В породах главной фазы Бурпалинского массива (нефелиновые, щелочные и кварцевые сиениты) и некоторых ранних жильных меланосиенитах массива кристаллизуются амфиболы субщелочного ряда: эдениты и гастингситы. Для поздних агпаитовых жильных нефелиновых сиенитов, мариуполитов и пегматитов характерны амфиболы щелочного ряда: рихтериты и арфведсонит - экерманиты. Их щелочной состав коррелируется с высокой агпаитовой щелочностью пород, из которых они образуются. Породы подобного состава встречаются также в приконтактовых с пегматитами фенитах.

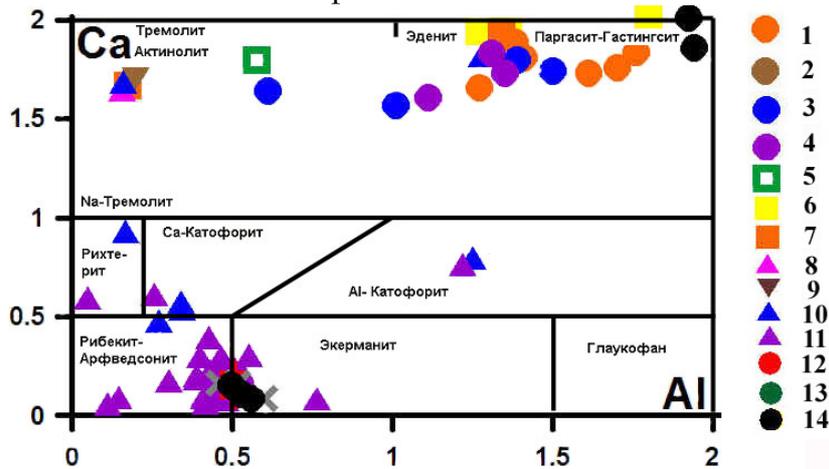


Рис. 8. Классификационная диаграмма амфиболов: Бурпалинский массив:

1- Не-сиениты, 2- пуласкиты ГИФ, 3- Qn-сиениты, 4- мариуполиты, 5- сиениты, 6- пегматиты центральной зоны, 7- дайки лейкосиенитов, 8- редкометальные пегматиты, 9- щелочные граниты, 11- апатит-флюоритовая жила, 12- фениты; Акитский массив: 13- Не-сиениты, 14- щелочные сиениты, 15- кварцевые сиениты.

На диаграммах парных корреляций петрогенных элементов (рис. 9а) наблюдаются единые тренды составов амфиболов для пород Бурпалинского массива. Это свидетельствует об их образовании из различных дифференциатов единой первичной магмы. На тройных диаграммах парных корреляций наблюдаются два тренда составов, отвечающих щелочным и нещелочным разновидностям. Однако от ранних пород к более поздним в амфиболах наблюдается увеличение щелочной составляющей - относительно Са и Fe-составляющей - относительно Mg.

Так как поздние пегматитовые дайки довольно разнообразного состава, состав амфиболов в них тоже имеет широкий диапазон вариации компонентов, но в пределах арфведсонит-экерманитового изоморфного ряда. Широкие вариации составов амфиболов в породах: от субщелочных к щелочным, свидетельствуют о значительной роли процессов дифференциации при кристаллизации пород массива

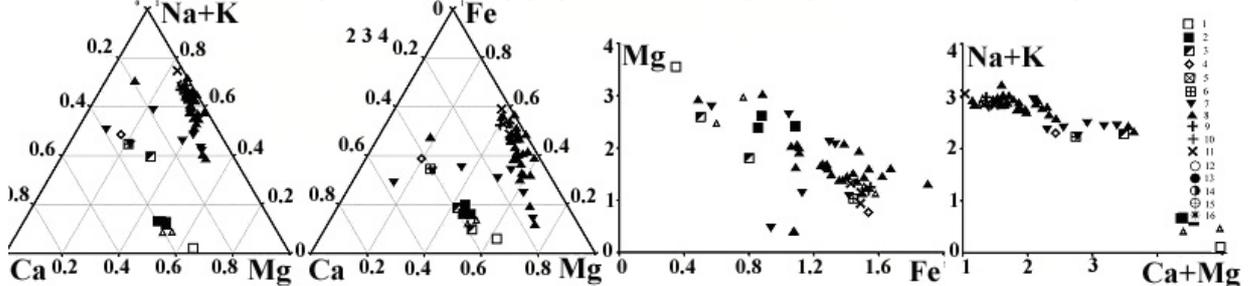


Рис 9а. Парные и тройные корреляции амфиболов Бурпалинского массива. Условные обозначения, как на рис. 8.

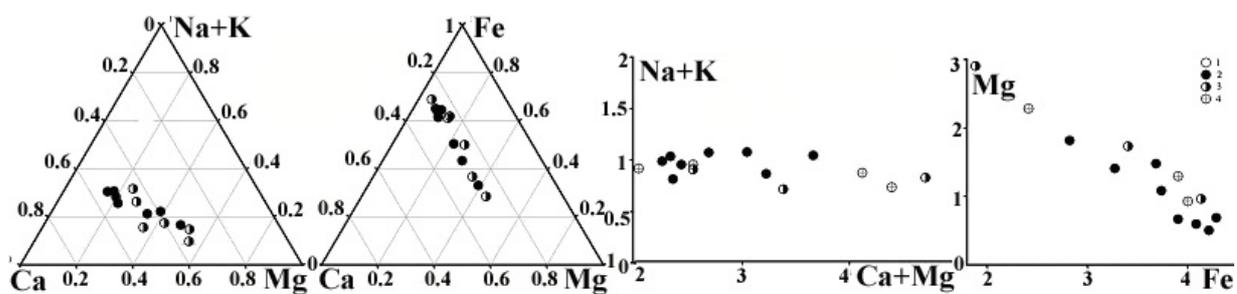


Рис. 9б. Корреляции составов амфиболов Аakitского массива: 1- нефелиновые сиениты, 2- щелочные сиениты, 3- кварцевые сиениты, 4- щелочные граниты.

Амфиболы Аakitского массива кристаллизуются только в нефелиновых, щелочных и кварцевых сиенитах, так как в массиве нет редкометальных агпайтовых пород, но в процессе дифференциации от ранних пород к более поздним наблюдаются хорошие корреляции между Mg и Fe (рис. 9б), т.е. возрастание Fe в амфиболах к более поздним породам. Это является хорошим подтверждением правильности новой схемы магматизма Аakitского массива. Составы амфиболов от ранних пород к более поздним меняется от Mg-эденитов до Fe-ганстингситов.

### **Пироксены.**

Пироксены Аakitского массива по составу относятся к диопсид-геденбергит-эгириновому ряду. В Не-сиенитах это диопсиды, в щелочных и Qu-сиенитах - диопсид-геденбергиты и в щелочных гранитах - это чистые эгирины. Наблюдается (рис.10) единый тренд изменения составов пироксенов от ранних пород к поздним, согласно предложенной нами схеме магматизма Аakitского массива.

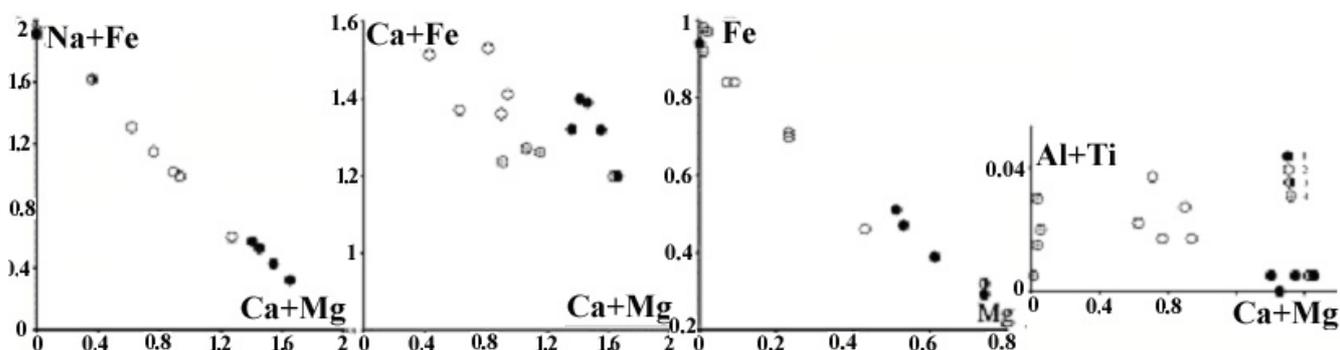


Рис. 10. Парные корреляции пироксенов Аakitского массива. Условные обозначения, как на рис 9б

В Бурпалинском массиве (рис 11, 12) также существует полный ряд пироксенов от диопсида с определенным количеством геденбергитового компонента до эгирина. При полном тренде составов (Ca+Mg)-(Na+Fe) пироксены почти не содержат Al-Ti минала, а соотношение диопсидового и геденбергитового минала меняется незначительно. Происходит увеличение только эгиринового минала. Диопсид-геденбергитовые составы характерны для шонкинитов и нефелиновых сиенитов. Далее, в щелочных и кварцевых сиенитах пироксены - эгирин-диопсидового состава и эгириновые пироксены характерны для редкометальных агпайтовых пегматитов и поздних даек агпайтовых гранитов. Еще более четко тренд дифференциации состава пироксенов от ранних пород массива к более поздним прослеживается на двойных диаграммах. Тренды дифференциации состава пироксенов в разных породах массива подтверждает правильность выделенной нами схеме магматизма массива.

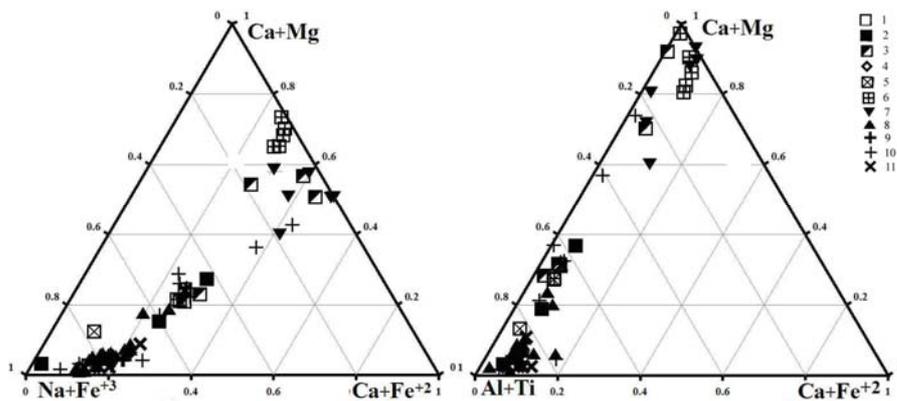


Рис.11.Тройные корреляционные зависимости составов пироксенов массива Бурпала:

1 - Не-сиениты,  
2- щелочные сиениты, пуласкиты ГИФ,  
3 - Qn-сиениты,  
4 - мариуполиты, 5 - неагпаитовые пегматиты

центра массива, 6 - Не-сиениты жильные, 7 - дайки шонкинитов, 8 - редкометалльные пегматиты, 9-аляскиты и щелочные граниты, 10-апатит-флюоритовые породы,11- фениты.

На двойных диаграммах (рис. 12) тренды состава - более четкие. Наблюдается довольно широкий спектр составов пироксенов из апатит-флюоритовых пород.

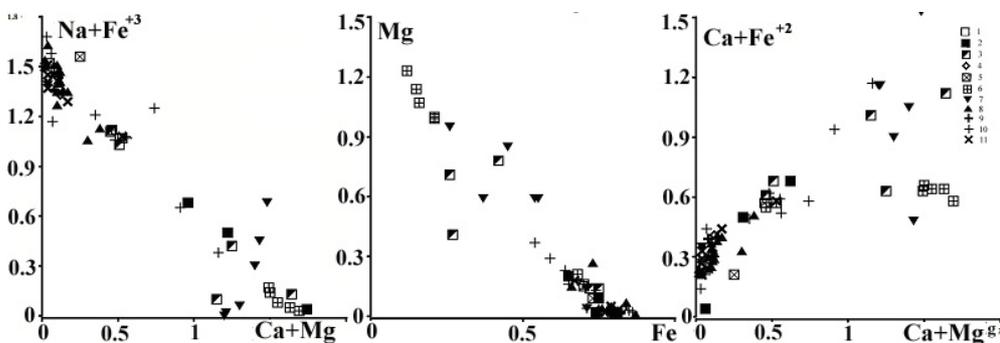


Рис. 12. Парные корреляции составов пироксенов массива Бурпала. Условные обозначения как на рис.11.

Эти породы, как и карбонатиты, кристаллизовались из насыщенной кальцием среды и поэтому в процессе их кристаллизации составы пироксенов изменяются от диопсид-эгириновых до чисто эгириновых.

### Типохимизм цирконосиликатов массива Бурпала.

Наиболее типоморфной ассоциацией минералов для данного массива являются цирконосиликаты. В массиве известны следующие минералы циркония: циркон, сейдозерит, ловенит, катаплеит, власовит, эльпидит, эвдиалит. Щелочные цирконосиликаты кристаллизуются исключительно в щелочных породах и связанных с ними пегматитах. Для их образования необходимым условием является: 1 - значительно повышенное, по сравнению с кларком, содержание циркония. Но в таких породах возможно образование только циркона, как в миаскитовых сиенитах и карбонатитах Урала, поэтому 2 условием образования цирконосиликатов является высокий  $K_A$  пород ( $K_A = Al/(Na+K)$ ), который значительно превышает 1. Для щелочных пород, когда  $K_A > 1$  - парагенезис циркона заменяется парагенезисом цирконосиликатов. Для более щелочных кремнекислых пород - щелочных гранитов переход парагенезисов с цирконом в цирконосиликаты происходит при  $K_A > 1.2$  (Владыкин 1983). С другой стороны, состав цирконосиликатов зависит от соотношения кремния к щелочам (с кальцием) в породах. На рис. 13а нанесены составы всех известных циркониевых минералов. По принадлежности минералов к определенным породам их можно разделить на три генетические группы. К I группе относятся циркониевые минералы, не содержащие Si в своем составе или содержащие его в незначительном количестве.

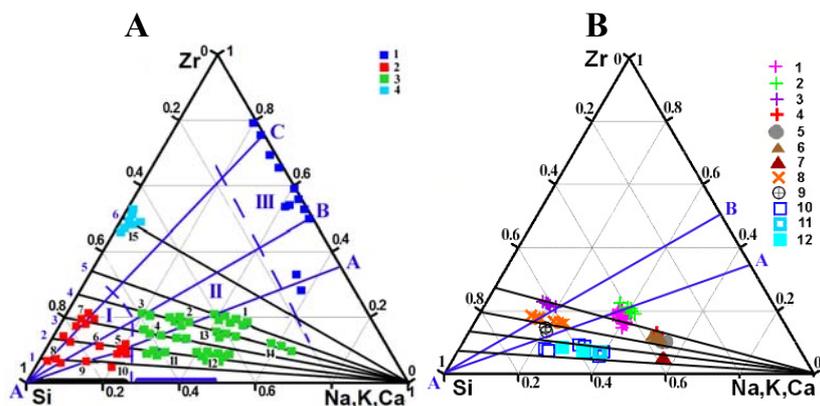


Рис. 13. Составы цирконосиликатов:

А- минералы: 1- ультраосновных щелочных пород, 2 - щелочных и Ne-сиенитов, 3 - щелочных гранитов, 4 - цирконы. (Владыкин 1983);

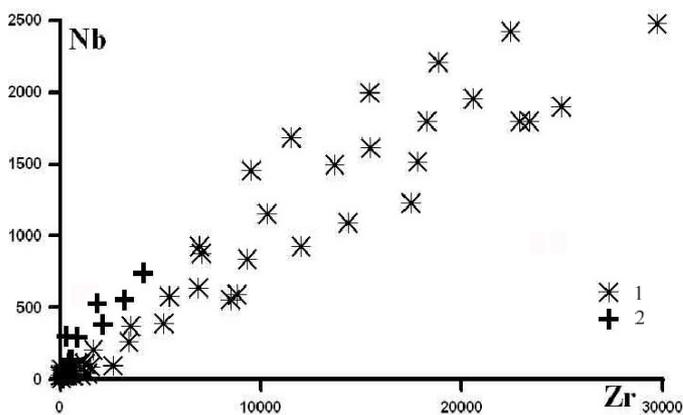
В - цирконосиликаты: массив Бурпала: 1- сейдозерит, 2- ловенит, 3- катаплеит, 4-

велерит, 8- власовит, 9- эльпидит, 10- эвдиалит, 5- гиортдалит (Норвегия), 6-7 -гетценит (Лос/Бразилия), 11-12- эвдиалит (Бразилия).

Это минералы ультраосновных - щелочных пород и карбонатитов. Ко II группе относятся минералы, из Ne- и щелочных сиенитов. К III группе - минералы с повышенным содержанием Si, которые встречаются в щелочных гранитах. Составы пород также попадают в одноименные группы. По линиям (а-а) и (а-б) от точек составов одних минералов к другим происходит скачкообразное увеличение кремнекислородного радикала на величину SiO<sub>2</sub>. Получаем следующий ряд радикалов: [SiO<sub>4</sub>]→[Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]→[Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>]→[Si<sub>4</sub>O<sub>11</sub>]→[Si<sub>6</sub>O<sub>15</sub>] и т.д. Отношение Si/Zr меняется в этом ряду: 1:2:3:4:6. На рис. 13б приведены составы новых анализов цирконосиликатов (в т.ч. массива Бурпала), они полностью соответствуют общей систематике (рис. 13а).

## Глава 5. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Концентрации REE в пегматитах Бурпалинского массива достигают следующих максимальных значений: Zr - 4%, TR - 2.5%, Y - 0.5%, Nb - 0.4% и представляют промышленный интерес. Наблюдается четкая прямая корреляция логарифмов концентраций Zr и Nb во всех породах комплекса. Концентрации редких элементов



имеют высокие значения и в карбонатитах Акитского массива.

Рис. 14. Диаграмма парных корреляций Zr и Nb (в г/т) в породах массива: 1 - Бурпалинский массив, 2 - Акитский массив.

### 5.1. Геохимия редкоземельных элементов.

TR в пегматитах Бурпалинского массива и карбонатитах Акитского массива являются рудным компонентом, и поэтому важно изучить поведение TR в процессе дифференциации редкометальной щелочной магмы. В связи с разным объемом щелочной магмы в Бурпалинском и Акитском массиве, отличается в них и поведение TR.

#### Бурпалинский массив.

Среднее содержание TR в щелочных породах главных интрузивных фаз Бурпалинского массива в 2 раза выше по сравнению с кларком в сиенитах. Наивысшее содержание суммы TR наблюдается в ранних дайках меланократовых шонкинитов (3000-4000 ppm). Концентрации суммы TR в сиенитах главной фазы равняются 500

ppm. Жильные сиениты и мариуполиты по содержанию TR не отличаются от сиенитов главной фазы (450-500 ppm). В пегматитах - содержания TR доходят до 3.6%.

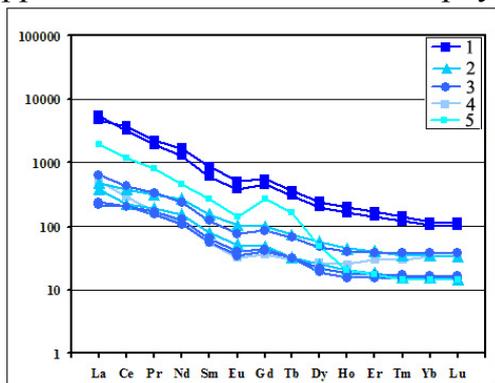


Рис.15. Распределение TR в сиенитах Бурпалинского массива: 1-шонкиниты, 2-нефелиновые сиениты, 3- пуласскиты, 4- кварцевые сиениты, 5- мариуполит.

Спектры TR (рис 15) в шонкинитах и сиенитах аналогичны, по наклону кривых, и по поведению отдельных элементов. Наблюдается очень незначительное фракционирование Eu,

что свидетельствует об отсутствии плагиоклазовых фаз в ранней магме Бурпалинского массива. Для всех спектров характерен небольшой наклон линии спектров, что говорит не о малой дифференцированности пород, а о первичном высоком содержании TR.

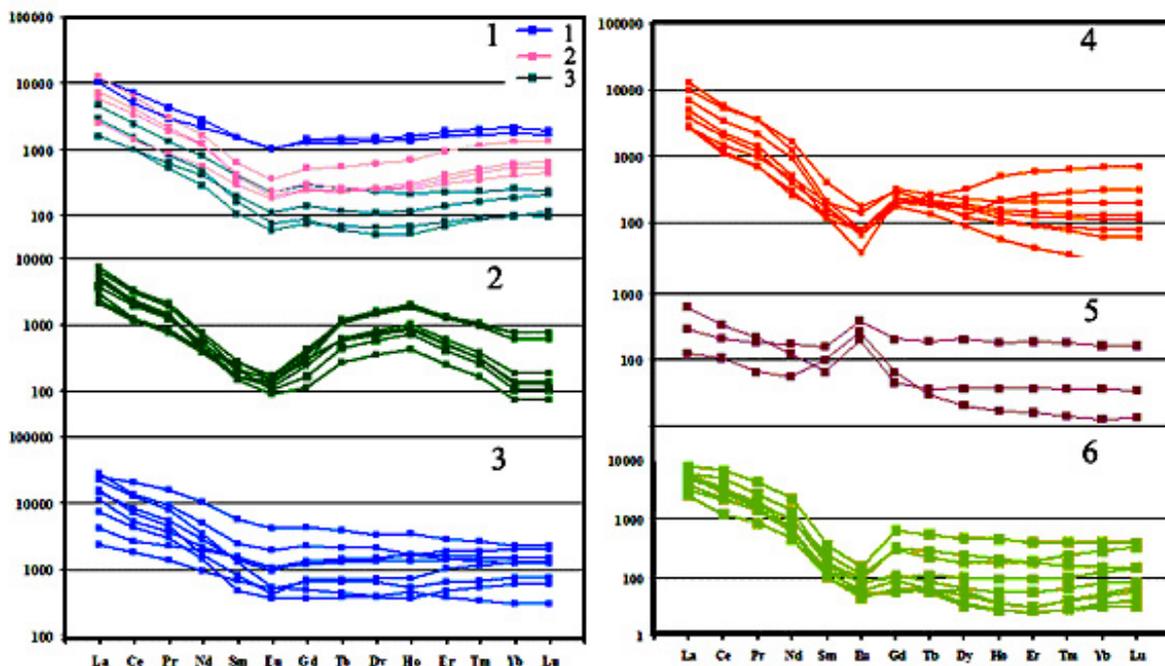


Рис. 16. Распределение РЗЭ в породах Бурпалинского массива: 1- пегматиты с: эвдиалитом (1), с сейдозеритом (2), с катаплеитом (3), 2- пегматиты с астрофиллитом, 3-пегматиты с ильменитом, 4- пегматиты с лопаритом и ловенитом, 5- альбитовые пегматиты, 6- пегматиты с лопаритом и ильменитом.

Для пегматитов Бурпалинского массива характерна большая дисперсия суммы TR, которая варьирует от 500 ppm до 36000 ppm, что можно объяснить высокой щелочностью пегматитов. Можно выделить 6 групп пегматитов, различающихся спектром TR. По спектрам TR в 1 группе пегматитов (рис. 16.1) можно выделить три разновидности пегматитов, где главным концентратором TR: 1 - является эвдиалит; 2 - игольчатые цирконосиликаты группы сейдозерита; 3 - катаплеит. Все три разновидности пегматитов являются высокощелочными (с большим Ca), что определяет кристаллизацию цирконосиликатов вместо циркона. Для всех спектров TR пегматитов 1-й группы характерен малый наклон линий спектров и также незначительное фракционирование Eu.

Для пегматитов 2-й группы характерны значительные содержания в них астрофиллита при переменных, незначительных концентрациях лопарита и цирконо-

силикатов. Для этой разновидности характерна синусоидальная линия спектра TR (рис. 16.2). Суммарное содержание TR соизмеримо с пегматитами 1-й группы.

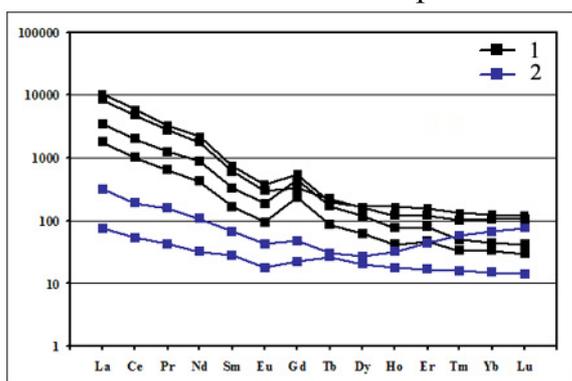
Пегматиты 3-й группы характеризуются значительными содержаниями Mn-ильменита. Кроме него, в варьирующих количествах, встречаются лопарит и Zr-силикаты. Для спектров TR этих пегматитов (рис. 16.3) характерен очень незначительный наклон спектра, при довольно высоких, по сравнению с другими пегматитами, содержаниями суммы TR. Фракционирование Eu в них почти полностью отсутствует и линия спектра после Eu почти горизонтальна.

В пегматитах 4-й группы (рис. 16.4) главным концентратором TR является лопарит и Zr-силикаты. В начале линия спектра (от La до Eu) имеет довольно резкий наклон вниз, затем испытывает подъем до Gd и далее проходит почти горизонтально до Lu с некоторой дисперсией в обе стороны. Спектр характеризуется некоторой аномальностью Sm, который находится практически на одной линии с Eu.

Пегматиты 5 группы характеризуются лейкократовым, существенно альбитовым составом. Редкометалльные минералы в ней присутствуют в очень незначительных количествах, поэтому суммы TR низкие. Спектр TR этих пегматитов резко отличается от других групп пегматитов (рис 16.6). В начале (от La до Sm) линия спектра почти горизонтальная, затем наблюдается резкое положительное фракционирование Eu (вверх) и далее (от Gd до Lu) линия спектра опять горизонтальная. Фракционирование Eu связано с накоплением его в альбитовой составляющей пегматитов.

В пегматитах 6-й группы среди концентраторов преобладают лопарит и ильменит, иногда встречается пироксенол. Спектры TR (рис.16.5) довольно похожи на спектры предыдущих групп пегматитов, но имеют свои особенности. В начале идет равномерное, довольно резкое, понижение линии спектра до Eu, затем резкий подъем спектра (от Eu до Gd) и далее почти горизонтально линии с некоторым подъемом линии спектра (от Gd до Lu).

Наиболее поздним образованием массива являются апатит-флюоритовая жила, содержащая магнетит, пироксен и слюду. Спектр TR (рис.17) характеризуется плавным наклоном линии спектра с положительной Gd аномалией. Во вмещающих породах



встречена небольшая жила кальцитового карбонатита с сульфидами и также небольшая жила кальцит-бrevстеритовых карбонатитов в центре массива.

Рис.17 Распределение TR в породах массива Бурпала: 1 - апатит-флюоритовые породы, 2 - карбонатиты.

По высокому содержанию TR эти карбонатные породы можно отнести к карбонатитам. Изотопия Sr-Nd в кальцитовой жиле также не противоречит этому выводу.

### Акитский массив.

Среднее содержание TR в щелочных силикатных породах Акитского массива близко к средним содержаниям в сиенитах. Наивысшее содержание суммы TR наблюдается в щелочных сиенитах (300 ppm). Концентрации суммы TR в нефелиновых и Qu- сиенитах равняются 150-160 ppm. В щелочных гранитах - 350 ppm. Содержание TR в сиенитах Акитского массива по сравнению с Бурпалинским в 2

раза ниже. В тайниолитовых карбонатитах массива концентрации TR возрастают от 300 до 500 ppm. На рис. 18.1 представлены спектры щелочных и нефелиновых сиенитов массива. Для них характерен очень небольшой наклон кривых REE. При том, линии спектра нефелиновых сиенитов располагаются ниже щелочных. Еще более низкие содержания в кварцевых сиенитах. Для щелочных гранитов характерно резкое возрастание относительных содержаний TR (от Tm до Lu). В них также наблюдаются высокие концентрации Y.

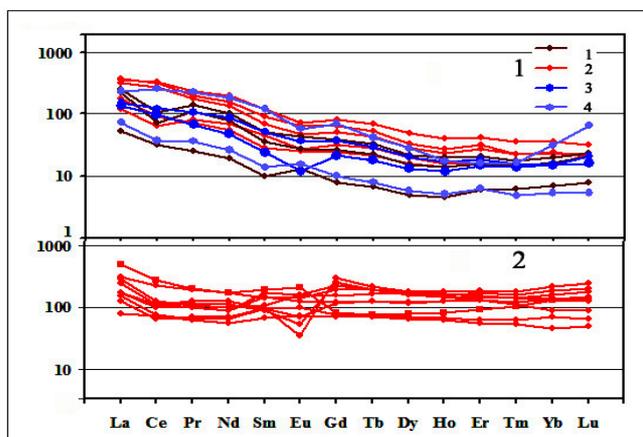


Рис. 18. Распределение TR в силикатных породах (1):

1 - нефелиновые сиениты,

2 - щелочные сиениты,

3 - кварцевые сиениты,

4 – щелочные граниты

и карбонатитах(2) массива Аakit.

Концентрации легких TR в карбонатитах (рис. 18.2) соизмеримо с содержаниями в щелочных сиенитах, а средних и тяжелых - даже выше. От La к Ce линия спектра идет вниз, а далее становится почти параллельной до Sm. Наблюдается более значительная Eu аномалия, чем в сиенитах. Содержания Gd резко возрастают, и далее линия идет почти горизонтально с некоторым возрастанием вверх от Tm до Lu, как в щелочном граните. Конфигурация спектров TR в карбонатитах доказывает их генетическую связь со щелочными гранитами.

## 5.2. Геохимия других редких элементов.

На спайдер-диаграмме (рис. 19) наблюдается дисперсия содержаний высокозарядных катионов и довольно плавные кривые элементов от Sm до Lu. Для нефелиновых сиенитов характерны наиболее высокие содержания U, Ta, La и напротив низкие содержания Sr, Sm и тяжелых TR. Щелочные сиениты главной фазы характеризуются напротив наиболее высокими концентрациями TR среди пород Аакитского

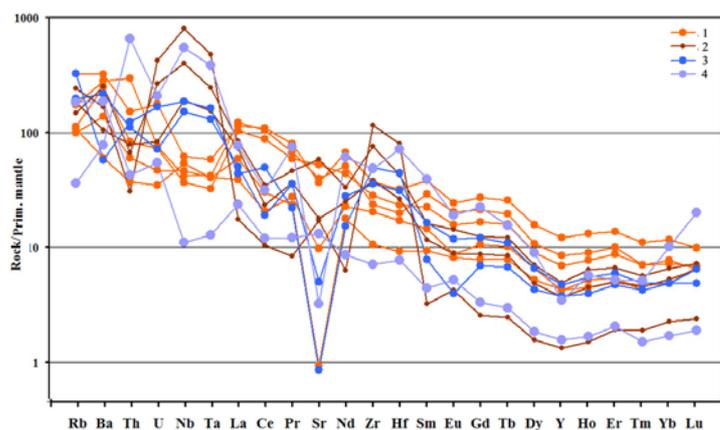


Рис. 19. Спайдер-диаграмма пород Аакитского массива:

1 - щелочные сиениты,

2 - нефелиновые сиениты,

3 - кварцевые сиениты,

4 - щелочные граниты.

массива от La до Lu и низкими концентрациями высокозарядных Ta, Nb, U. В эгириновом щелочном граните отмечается резкое возрастание Yb, Lu. В целом, для магматических пород массива наблюдается довольно равномерный тренд состава элементов с некоторой дисперсией содержания Nb, Ta, Zr, Hf. Исходя из спектра TR на этой диаграмме можно считать, что все породы массива имеют единые генетические корни.

Спайдер-диаграммы магматических пород главных фаз Бурпалинского массива (рис. 20.1) отличаются от диаграмм Аакитского массива. Для них характерен более плавный и компактный спектр. В начале идет плавное понижение относитель

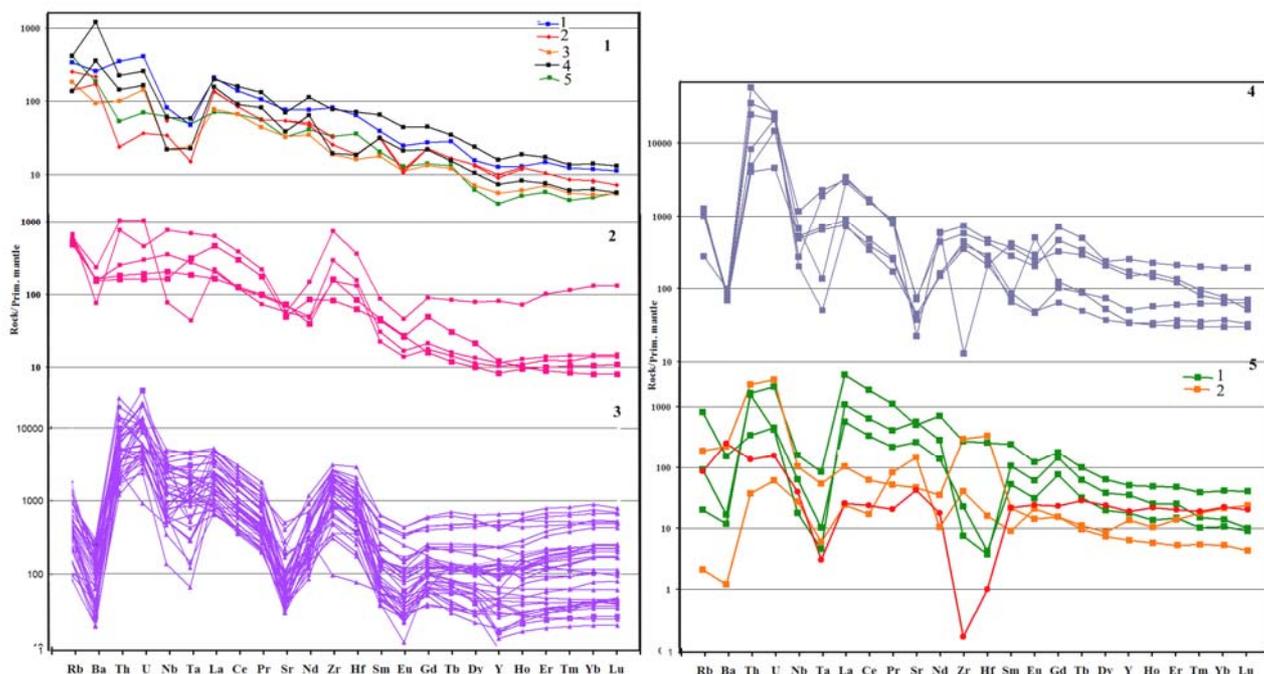


Рис. 20. Спайдер-диаграмма пород Бурпалинского массива: 1-1-шонкиниты, 2- Не-сиениты, 3- пуласкиты, 4- кварцевые сиениты, 5- мариуполит; 2- мариуполиты, 3- пегматиты, 4- фениты, 5- 1-апатит-флюоритовые породы, 2-карбонатиты.

ных концентраций от Rb до Ta, затем резкий подъем фигуративных точек La и затем постепенное понижение относительных концентраций до конца спектра. Наивысшее содержание элементов (верхняя часть графиков) характерна для ранних пород - шонкинитов и нефелиновых сиенитов. Ниже этих линий располагаются спектры жильных гранитов. Линии пород главной фазы - пуласкитов и кварцевых сиенитов имеют следующие тенденции: в начале спектра они располагаются между линиями нефелиновых сиенитов и гранитов, а начиная с Tb линия пуласкитов располагается ниже линии гранитов. В общем плане линии всех пород интрузивной части располагаются компактно, что подтверждает их генетическую общность.

Спайдер-спектры жильных апатитовых сиенитов – мариуполитов довольно резко отличаются от спектров интрузивных пород главной фазы (рис 20.2). Для них характерны резкие положительные аномалии от Th - U с постепенным понижением к Nb, Ta, La, Ce и отрицательной аномалией для Sr. Затем идет резкая положительная аномалия Zr, Hf с постепенным снижением до Eu. А далее, мы имеем почти горизонтальные линии спектра элементов, а в одном из образцов даже возрастание содержаний от Ho до Lu. По форме, спектры мариуполитов очень похожи на спектры редкометалльных пегматитов (рис. 20.3). Все это свидетельствует о том, что жильные породы Бурпалинского массива произошли из остаточного дифференциата магмы главной фазы, которая испытала довольно значительную дифференциацию после отделения от магмы основной фазы, что привело к резкому накоплению REE и изменению внутренних химических связей между ними.

Большая аналитическая выборка содержаний TR для всех разновидностей пегматитов представлена на спайдер-диаграммах (рис. 20.3). Несмотря на сильное различие минеральных парагенезисов редкометалльных минералов в отдельных телах пегматитов для них характерен очень компактный тренд линий этих элементов с одинаковыми положительными и отрицательными аномалиями. В начале наблюдается отрицательная аномалия Ba, по сравнению с Rb, затем резкий подъем по

Th-U, затем начинается понижение от Nb-Ta к La-Pr и затем резкая отрицательная аномалия Sr, далее начинается опять резкий подъем Nb, Zr, Hf и опускание линии спектра до точек Eu. Затем форма спектров от Eu до Y имеет положительную дугообразную форму с максимумом на Tb и далее постепенное повышение до Yb. В целом, от Sm - линии точек составов располагаются почти горизонтально с довольно незначительными вариациями относительных содержаний в элементах по отношению к примитивной мантии от 20 до 1000 ppm. Спайдер-спектры фенитов, которые образовались на контакте реакционных редкометальных пегматитов со сланцами почти полностью повторяет конфигурацию спектров в пегматитах. Характерными для них являются более высокие концентрации U и особенно Th, которые реализуются в минеральных фазах в меланоцерите, бритолите и ринколите. Линии TR у одних фенитов горизонтальные, а у других наблюдается их понижение (от Gd до Lu) (рис. 20.4).

Спайдер-диаграмма TR апатит-флюоритовых пород и карбонатитов (рис. 20.5) похожа на диаграмму пегматитов, но для некоторых элементов значительно отличается от них. Для них также характерны отрицательные аномалии Ba, Nb, Ta и положительные аномалии Th и U, но отсутствует отрицательная аномалия Sr. Затем наблюдается довольно резкая отрицательная аномалия Zr-Hf со значительным подъемом Sm и далее линия спектра плавно опускается до тяжелых REE. Для карбонатитов массива характерны примерно те же особенности, что и для апатит-флюоритовых пород. Спектры тайниолитовых карбонатитов Акитского массива повторяет конфигурацию линий карбонатитов массива Бурпала с двумя резкими отличиями: отсутствием положительной аномалии U и Th и еще более резкой отрицательной аномалией Zr и Hf.

## **Глава 6. ГЕНЕЗИС, ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЯ И МАНТИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОРОД.**

Массивы Акит и Бурпала интенсивно изучались в 60-нач.70-х годов, когда у геологов СССР господствовала метасоматическая гипотеза образования многих пород. Все редкометальные проявления силикатных пород (редкометальные щелочные и Li-F граниты, альбититы, калишпатиты и др.) и карбонатиты, все полосчатые породы и тем более породы, содержащие альбит, флюорит, топаз и другие высокощелочные и с летучими компонентами минералы, все эти породы считались безоговорочно метасоматическими, притом метасоматоз не надо было доказывать. Естественно, что все редкометальные образования массивов Бурпала и Акит считались метасоматическими и даже типично магматические дайковые породы, как например «мариуполиты», со структурами течения и т.д., относились к породам метасоматического генезиса. Жидковым А.Я. на массиве Бурпала даже выделялась субфаза метасоматитов, между магматическими фазами внедрения. Разумно объяснить такое выделение невозможно. Все интрузивные и жильные породы Бурпалинского массива имеют типичные признаки магматических пород: трахитоидность, структуры течения, приконтактные закалки, отсутствие реакционных взаимоотношений с вмещающими породами и тд. и по генезису несомненно относятся к магматическим образованиям. Редкометальные образования Бурпалинского массива вслед за А.М. Портновым мы называем пегматитами, хотя они редко имеют крупнозернистое строение и чаще средне- и мелкозернистые. На массиве нет коренных обнажений этих пород, обнаружены они в курумных осыпях и в канавах по этим осыпям, поэтому геологические формы тел определить часто трудно. В неко-

торых канавах встречались их резкие контакты с кварцевыми сиенитами, свидетельствующие о жильных формах тел. В канаве массива вскрыт их контакт с вмещающими сланцами, где хорошо видна фенитизация сланцев мощностью 5 м. Сланцы превращаются в щелочные метасоматиты с сохранением мелкозернистой структуры сланцев. Эти образования и по текстурам и структурам, и по редкометальным фазам минералов значительно отличаются от вещества самих пегматитов. Пегматиты по структуре полосчатые, с перемежаемостью лейкократовых (калишпат-альбитовых, иногда с нефелином) полос с меланократовыми (эгиринарфведсонитовыми полосами). Редкометальная минерализация также распределена неравномерно, что характерно для редкометальных пород. Все эти явления мы объясняем процессами расслоения высокощелочного расплава, обогащенного редкими элементами и летучими компонентами. Подобные явления получены в многочисленных экспериментальных работах по щелочным расплавам (*Маракушев, Сук 1998*). Мы считаем, что редкометальные пегматиты - это отдельные апофизы большого тела, которые аналогичны жильным образованиям сиенитов и относятся к фазе жильных пород Бурпалинского массива. Неравномерность редкометальной минерализации в этих породах объясняется большой дисперсией содержаний редких элементов в щелочных расплавах, что характерно для высокощелочных магм.

Вещественно-геохимические особенности оруденения, сопровождающего Аkitский массив, подобны минерализации ассоциирующей со щелочными гранитами. В первую очередь это касается повышенной роли Y и тяжелых лантаноидов. Оно характеризуется также повышенными концентрациями F, Th, присутствием тайниолита, Nb-содержащего рутила, а проявление минерализации в карбонатных жилах (карбонатитах) свидетельствует об их генетической связи с сиенитовыми магмами. Таким образом, предложенная нами схема магматизма массива, когда нефелиновые сиениты сменяются щелочными сиенитами, кварцевыми сиенитами и щелочными гранитами объясняет наличие 2 тенденций оруденения - сиенитовой (карбонатиты) и щелочногранитной (Y - специфика оруденения).

### **Термобарогеохимия**

Первые исследования расплавных включений в щелочных по породам Сын-нырского массива показали высокие температуры их образования (1100-840<sup>0</sup>C) и снижение их от ранних пород к поздним [Панина, 1972].

На наших образцах, В.Ю Прокофьевым (ИГЕМ) проведены термобарогеохимические исследования апатит-флюоритовых пород Бурпалинского массива. Флюидные включения в пробах с Бурпалмнского массива изучались в специально изготовленных прозрачно-полированных пластинах с использованием оптического микроскопа «Olimpus VX51», оснащенного высокоразрешающими объективами. Во флюорите было обнаружено большое количество первичных флюидных включений размером 15–50 мкм (рис. 21). По фазовому составу флюидные включения однотипны: многофазовые включения хлоридных рассолов, содержащие газовый пузырек, водный раствор, один или несколько изотропных кристаллов хлоридов и анизотропную фазу (рис. 21б, г). Для термо- и криометрических исследований выбирались флюидные включения, равномерно распределенные по объему отдельных зерен флюорита и отнесенные нами к первичным включениям.

Результаты термо- и криометрических исследований 27 индивидуальных флюидных включений во флюорите показали, что в составе рассолов включений преобладали хлориды Na и Ca, иногда Mg. Об этом свидетельствуют хлоридные эвтектики растворов включений в температурном интервале –53...–56<sup>0</sup>C, а также наличие до-

черного галита, который диагностирован по переходу его в гидрогалит при замораживании раствора включений (обратный переход в галит происходит при температурах от 0.0 до 0.5 °С).

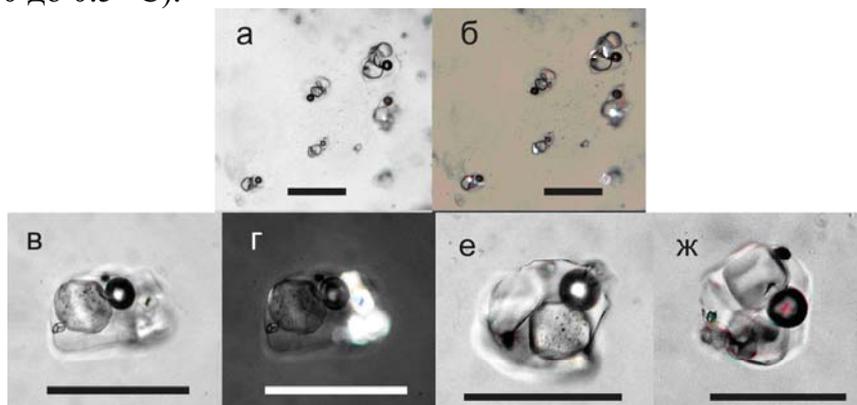


Рис. 21. Многофазовые флюидные включения хлоридных рассолов во флюорите месторождения Бурпала: а, в, е, ж – николи II, б, г – николи +. Масштаб 50 мкм.

Анизотропная фаза растворяется первой при температурах от 40 до 80 °С и может являться бикарбонатом, сульфатом или боратом. Изотропные кристаллы галита растворяются при температурах от 460 до 480 °С, что соответствует концентрациям солей от 55 до 57 мас. %-экв. NaCl. Полная гомогенизация включений рассолов достигается при температурах от 520 до 560 °С

Кроме рассольных включений во флюоритах были обнаружены расплавные включения в апатитах, температуры гомогенизации которых по предварительным данным более 800<sup>0</sup>С. Все это, свидетельствует об образовании этих пород из остаточного расплав-флюида, отщепленного от силикатного редкометального расплава пегматитов. По геологическим данным наблюдаются пересечения пегматитов апатит-флюоритовыми породами, а по петрохимическим и геохимическим данным эти породы укладываются в общий тренд дифференциации щелочной магмы Бурпалинского массива (рис. 21).

Эта магма содержала малые концентрации CO<sub>2</sub> и повышенные P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и F, которые в процессе ее дифференциации значительно накопились и отделились от расплава пегматитов. Они аналогичны фоскоритовым образованиям карбонатитовых комплексов, при таком же высоком содержании кальция, только вместо кальцита образуется апатит и флюорит совместно с другими «фоскоритовыми» минералами - магнетитом, слюдой и пироксеном. Притом, как и в фоскоритах - пироксен не эгиринового, а диопсид - геденбергитового состава.

Нами была обнаружена жила гранита, которая сечет апатит-флюоритовые породы, что подтверждает положение о генетическом родстве этих пород и отделении их расплав-флюида от пегматитов, а гранитная составляющая связана со следующей фазой внедрения и имеет свою ассоциацию редкометальных минералов.

#### **Мантийные источники по данным геохимии изотопов**

Получены первые данные по геохимии изотопов Sr-Nd и Pb для Бурпалинского и Акитского массивов. Как видно из диаграммы (рис. 22) для обоих массивов характерен мантийный источник EM-2, что согласуется с их геологическим положением – в складчатой зоне Сев. Прибайкалья. Как показано ранее (Владыкин, 2005), для массивов глубинного происхождения, образовавшихся в складчатых

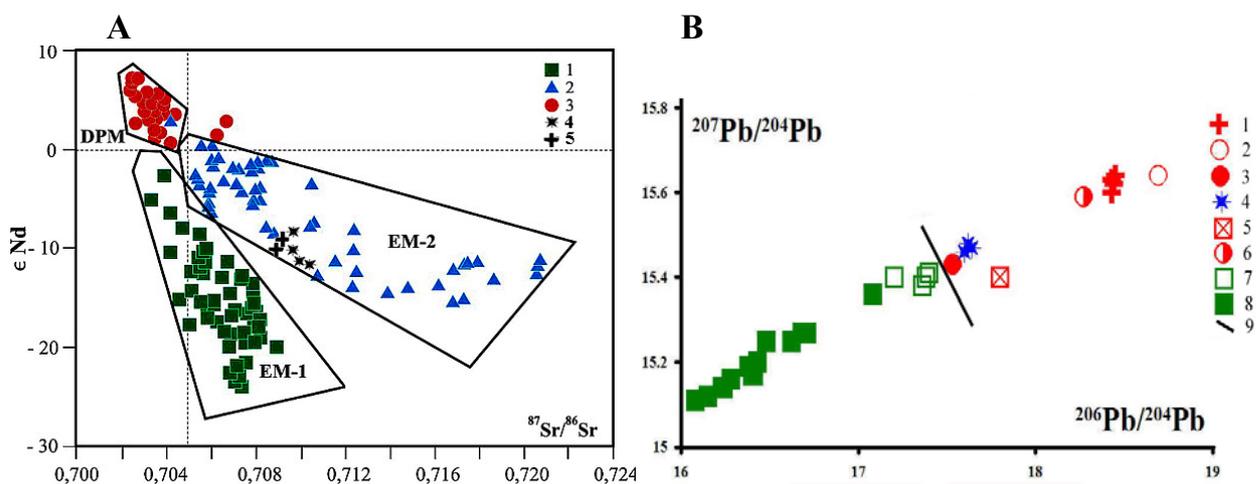


Рис.22. **А- Sr-Nd систематика щелочных пород** : щелочные породы: 1 - щитов, 2 - складчатых зон, 3 - обрамления платформ (по Владыкину 2005), 4 - Бурпалинский массив, 5 - Аkitский массив; **В- Соотношение изотопов Pb в щелочных породах**: 1 - Лугингол, Монголия, 2 - Ермаковка, 3 - Манханула, Монголия, 4 - Бурпала, 5 - Дарай- Пиоз, Тянь Шань, 6 - Свидни, Болгария, 7 - Инагли, Центр. Алдан, 8 - Мурунский массив, Алдан. 9 - линия, разделяющая метки изотопов щелочных пород щитов и складчатых зон.

зонах характерен мантийный источник EM-2. Высокие значения меток изотопов Sr этого источника объясняется контаминацией корового материала (рикциклином) с высокими метками изотопов стронция этой мантией при субдукции этого корового материала по зонам Бенъофа.

Изотопия свинца так же подтверждает глубинный источник магмы Бурпалинского массива (рис. 22). С левой стороны от разделительной линии располагаются метки составов изотопов свинца из щелочных массивов Алданского щита (тип мантийного источника EM-1), а с правой – массивы складчатых зон (Монголии, Бурятии, Тянь- Шаня, Болгарии) – с типом источника EM-2. В это поле и попадают точки изотопов пород Бурпалинского массива. Все изотопные данные свидетельствуют об образовании магм обоих массивов из мантийного источника EM-2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы работы можно сформулировать следующим образом:

1. На основе изучения геологии и петрохимии пород Бурпалинского и Аkitского массивов выяснено, что кристаллизация магмы идет по следующему схеме: шонкиниты → Ne- сиениты → щелочные сиениты → Qu- сиениты → щелочные граниты → щелочные пегматиты → апатит-флюоритовые породы → карбонатиты. Возраст сиенитов Аkitского массива - 200 млн. лет, карбонатитов - 186 млн. лет, а пегматитов Бурпалинского массива - 287 млн. лет.
2. В процессе дифференциации щелочной магмы в породообразующих пироксенах и амфиболах идет возрастание Na-Fe составляющих и Fe относительно Mg в слюдах, а в карбонатитах образуется Li-F-Mg слюда – тайниолит.
3. Редкометальная специфика пегматитов массива Бурпала реализуется образованием Zr- силикатов, повышение кремнекислотности которых согласуется в минералах и породах с образованием ряда  $[\text{SiO}_4] \rightarrow [\text{Si}_2\text{O}_7] \rightarrow [\text{Si}_3\text{O}_9] \rightarrow [\text{Si}_4\text{O}_{11}] \rightarrow [\text{Si}_6\text{O}_{15}]$ .
4. Поведение редких элементов закономерно меняется от ранних пород к поздним. В пегматитах Бурпалинского массива 6 различных типов спектров TR определяют парагенезисами редкометальных минералов.

5. По геологическим и термобарогеохимическим данным силикатные породы обоих массивов образовались из магматического расплава, а апатит-флюоритовые породы - из остаточного флюид-расплава при  $T=900-560^{\circ}\text{C}$ . По изотопным данным Nd-Sr и Pb их первичные магмы образовались из мантийного источника EM-2.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Владыкин Н.В., **Новикова (Сотникова) И.А.** Типохимизм цирконосиликатов Бурпалинского массива // Геохимия магматических пород, Москва, 2002. - С. 28-29.
2. Владыкин Н.В., Miyazaki T., Торбеева Т.С., **Новикова (Сотникова) И.А.** К вопросу генетического единства карбонатитов и руд Томтора // Геохимия магматических пород, Москва, 2002. С. 30-32.
3. Владыкин Н.В., **Новикова (Сотникова) И.А.** Уникальные массивы К-щелочных пород Сибири // Геохимия магматических пород, Апатиты, 2003. - С. 40-41.
4. **Новикова (Сотникова) И.А.** Некоторые минералогические - геохимические особенности Бурпалинского массива // Современные проблемы геохимии - С. 28-32.
5. Vladykin Nikolai, Torbeeva Tamara, **Novikova (Sotnikova) Irina.** Lamproite and karbonatite of the Tomtor massif, and their genesis. // 32-nd International Geological Congress, Italy, August 20-28, 2004: Abstracts Volume. - Florence, 2004. - P.640.
6. Рипп Г.С., Владыкин Н.В., Дорошкевич А.Г. **Сотникова И.А.** Аkitский массив щелочных пород и ассоциирующее с ним оруденение. // Глубинный магматизм, его источники и плюмы, Иркутск, 2006. - С. 270-286.
7. **Сотникова И.А.** Химический состав и петрохимические особенности Аkitского массива. // Современные проблемы геохимии. Материалы конференции молодых ученых. – Иркутск: Изд.-во Ин-та географии СО РАН, 2006. –С. 39-45
8. **Сотникова И.А.** Особенности состава редких разновидностей слюд из карбонатитов Аkitского массива. // Современные проблемы геохимии Материалы конференции молодых ученых. – Иркутск, 2007. С. 57-59.
9. **Сотникова И.А.** Химический состав пироксенов Бурпалинского массива. // Современные проблемы геохимии. – Иркутск, 2007. С. 63-66.
10. **Сотникова И.А.**, Владыкин Н.В. Геохимические особенности и парагенезисы минералов руд щелочных комплексов Сев. Прибайкалья. // Рудоносность ультрамафит-мафитовых и карбонатных комплексов складчатых областей. Улан-Уде: Изд.-во БНЦ СО РАН, 2008. – С. 69-72.
11. **Сотникова И.А.**, Владыкин Н.В. Особенности состава редких слюд из редкометальных щелочных комплексов Сев. Прибайкалья. // Геохимия магматических пород. - Санкт-Петербург-Москва: Изд.-во ГЕОХИ РАН, 2007. –С. 151-152.
12. **Сотникова И.А.** Химический состав пироксенов Бурпалинского массива. // Современные проблемы геохимии, Иркутск, 2007. –С. 63-66.
13. **Сотникова И.А.**, Владыкин Н.В. Петрохимические и минералогические особенности редкометальных массивов Сев. Прибайкалья. // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. - Иркутск: Изд.-во ИрГТУ, 2009. – №9(35) – С. 100-110.
14. **Сотникова И.А.**, **Владыкин Н.В.** Химический состав, условия образования тайниолитов // Записки Российского минералогического общества, 2009, №5, с.90-96.
15. **Сотникова И.А.** Геохимические и генетические особенности массивов Сев. Прибайкалья. Современные проблемы геохимии Иркутск: Изд.-во Ин-та географии СО РАН, 2009. – С. 85-89.