

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ  
РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПЕТРОГРАФИИ, МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

*На правах рукописи*

Куликов Вячеслав Степанович

**ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫЙ МАГМАТИЗМ РАННЕГО  
ДОКЕМБРИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА**

Специальность 04.00.08 - петрография, вулканология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

**МОСКВА 1990**

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА В ИНСТИТУТЕ ГЕОЛОГИИ КАРЕЛЬСКОГО  
НАУЧНОГО ЦЕНТРА АН СССР

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: ДОКТОР ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ  
НАУК, ПРОФЕССОР ПЕТРОВ В.Л.  
ДОКТОР ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ  
НАУК, ПРОФЕССОР ЧЕРНЫШОВ Н.М.  
ДОКТОР ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ  
НАУК, ПРОФЕССОР ШТЕЙНБЕРГ Д.С.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ — ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОХРОНО-  
ЛОГИИ ДОКЕМБРИЯ АН СССР.

ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ СОСТОИТСЯ "...5..." 11.09.88 1991 г.  
В 15 ЧАСОВ НА ЗАСЕДАНИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА  
Д.002.88.01, ИГЕМ АН СССР, МОСКВА, Ж-17 СТАРОМОНЕТНЫЙ ПЕР. 35

С ДИССЕРТАЦИЕЙ МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ В БИБЛИОТЕКЕ ИГЕМ  
АН СССР.

АВТОРЕФЕРАТ РАЗОСЛАН "...1..." 11.09.88 1991 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

ЛОБАНОВ К.В.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Балтийский щит — наиболее изученная и представительная область докембрия Европы, где установлено широкое развитие высокомагнезиальных (более 9%  $MgO$ ) магматитов. До недавнего времени практически все ультрамафиты щита, обычно в разной степени метаморфизованные, воспринимались как интрузивные (иногда протрузивные) породы, что резко снижало их значение в раскрытии характера докембрийского магматизма, в первую очередь вулканизма, а также не позволяло определять место этих образований в соответствующих этапах развития территории. Отсутствовали обобщающие работы по высокомагнезиальному вулканизму и оценки перспектив его рудоносности в докембрии Балтийского щита. Но при этом изучению ультрамафитов на щите всегда придавалось важное значение и полученные многочисленными исследователями результаты по различным районам внесли значительный вклад в познание докембрийской истории региона, петрогенезиса магматитов, способствовали выявлению ряда рудопроявлений и месторождений полезных ископаемых. Среди исследователей, принадлежащих различным научным и производственным организациям разных стран Европы, в первую очередь следует назвать Т. Алапиейти, В. Аурейя, А. И. Богачева, Г. И. Горбунова, А. Б. Вревского, Н. А. Волоотовскую, Г. Гаала, М. Н. Годлевского, Н. А. Елисеева, М. М. Ефимова, С. И. Зака, Е. С. Заскинда, В. И. Кочнева-Первухова, Е. К. Козлова, Н. А. Корнилова, В. С. Куликова, В. В. Куликову, М. М. Лаврова, Ф. Ю. Левинсон-Лессинга, С. А. Морозова, Х. Папунена, Т. П. Пириайнена, Д. В. Полферова, М. Г. Попова, В. В. Проскурякова, А. К. Симона, В. Ф. Смолькина, В. Д. Слюсарева, В. С. Степанова, А. В. Федюка, Е. Хански, Х. Хенриксена, Т. Хякли, А. Хухма, Е. В. Шаркова, Г. Л. Шабалдина, К. А. Шуркина, Ю. Н. Яковлева и многих других.

Актуальность проблемы. Высокомагнезиальные магматиты, являясь производными мантийных расплавов, несут главную информацию о составе и динамике мантии и нижних уровней литосферы, необходимую для разработки глобальных проблем петрологии, тектоники, теории Земли. При этом докембрийский магматизм представляет наибольший интерес, так как позволяет получать данную информацию о ранних этапах формирования



планеты. Необратимость и направленность развития Земли предполагает существование специфических условий в докембрии как на поверхности, так и в ее литосфере и мантии, которые существенно отличались от современных. Раскрытие этой специфики возможно через глубокое комплексное изучение магматитов докембрия, особенно высокомагнезиальных.

РевOLUTIONИОННЫМ моментом в исследовании ультрамафитов явилось открытие коматиитов с доказательством их вулканогенной природы, а следовательно, и высокотемпературных коматиитовых расплавов. Впервые геологическими методами стало возможным стратифицировать ультрамафитовые магматиты и определять их место в истории развития отдельных структур, районов и провинций.

С высокомагнезиальным магматизмом связан определенный комплекс полезных ископаемых — медь и никель, редкие и благородные металлы, а также железо, титан, хромиты, асбест, тальк, магнезит, апатит, алмазы и другие полезные ископаемые. Новый взгляд на генетическую природу ряда высокомагнезиальных пород требует и их новой металлогенетической оценки.

Целью работы является изучение специфики высокомагнезиального магматизма и его эволюции в раннем докембрии Балтийского щита.

В задачи исследований входило:

- а) изучение геологического строения наиболее информативных структур архейских зеленокаменных поясов и раннепротерозойских синклиналий зон Балтийского щита с выявлением в них места и объема высокомагнезиальных магматитов и составлением средне- и мелкомасштабных геологических карт;
- б) выделение формаций и серий высокомагнезиальных магматитов в докембрии;
- в) выявление пространственных и временных закономерностей развития мафит-ультрамафитового магматизма в раннем докембрии щита;
- г) анализ геодинамических обстановок проявления высокомагнезиального магматизма и определения его роли в формировании структуры щита;
- д) систематизация связей полезных ископаемых, в том числе нетрадиционных для региона, с высокомагнезиальными магма-

татами.

Фактический материал. В основу работы положены материалы, полученные автором в процессе детальных исследований (обнажения, горные выработки, сотни скважин ПГО "Севзапгеология" и "Архангельскгеология") архейских и протерозойских магматических и осадочных комплексов ряда районов Центральной, Восточной и Северной Карелии, а также прилегающих районов Мурманской и Архангельской областей, проводившихся в течение 1962–1988 гг. по тематическому плану Института геологии Карельского филиала АН СССР, в том числе по заданиям ГКНТ СССР и Мингео СССР. Используются также результаты личных наблюдений, в основном по высокомагнезиальным магматитам Южной, Центральной, Северной и Западной Карелии, Печенгской структуры, Центральной, Юго-Западной и Северной Финляндии, полученные в ходе геологических экскурсий совместно с советскими и зарубежными коллегами.

При подготовке работы был использован следующий аналитический материал: более 700 силикатных анализов пород (из них свыше 300 оригинальных) и минералов (26), анализы РЗЭ (17), изотопов серы (3), выполненных в Карельском филиале АН СССР и других организациях. Часть проб для анализов отбиралась в совместных маршрутах с В.В.Куликовой и другими коллегами. В процессе работы было изучено более 2 000 шлифов и аншлифов с необходимыми определениями оптических констант минералов и количественно-минералогическими подсчетами. Данные изотопного возраста по юго-восточной окраине Балтийского щита, приводимые в диссертации, получены при выполнении тематических исследований Института геологии Карельского филиала АН СССР под руководством автора. При этом К-Аг возраст определялся в ИМГРЭ и ИГЕМ АН СССР, Рb-Рb — в ИГГД АН СССР и Sm-Nd — в ИГЕМ АН СССР. Обработан и использован обширный литературный материал.

Методы исследований. Обобщение материалов по высокомагнезиальному магматизму докембрия Балтийского щита проводилось с использованием традиционных методов формационного и фациального анализа с учетом специфики докембрийских образований. Анализ геотектонического развития как отдельных ключевых структур, так и Балтийского щита в целом базировался на основе

составления соответствующих геологических, формационных, тектонических и других специальных карт и схем. Изучение вещественного состава магматитов и их метаморфических производных осуществлялось комплексными методами полевой геологии, палеовулканологии, петрографии и петрохимии. При обработке массовой петрохимической и геохимической информации применялись различные математические методы. Для решения вопросов генезиса пород коматиитовой серии, их структур и текстур, использовались методы экспериментальной петрологии и непосредственного воспроизведения структур вулканических пород.

Основные защищаемые положения. 1. Раннедокембрийским эпохам развития территории Балтийского щита свойственно широкое площадное и временное (не менее 10 фаз) проявление высокомагнезиального магматизма, связанного преимущественно с ранними и средними этапами формирования эволюционирующих во времени структур рифтогенного типа (рифтоиды позднего архея — протоавлакогены и проторифты раннего протерозоя).

2. В ряде районов Балтийского щита на основании геологических, петрологических и геохимических данных установлена комагматичность высокомагнезиальных вулканитов и разноглубинных плутонитов. При этом их родоначальным магмам как в промежуточных очагах литосферы, так и в лавовых потоках свойственна интенсивная дифференциация, контролируемая преимущественно фракционированием оливина.

3. Выявленная на одном из крупнейших ареалов развития докембрия (Балтийский щит) последовательность проявления высокомагнезиальных магматитов различной сериальной принадлежности имеет эволюционную направленность: коматиитовая серия максимальное распространение получает в архее, толеитовая — в раннем протерозое, а щелочно-ультрамафитовая — в конце раннего протерозоя и рифее, отражая соответствующие преобразования глубинных геосфер, что подчеркивается, как правило, обогащенностью однотипных высокомагнезиальных пород протерозоя, по сравнению с археем, титаном, цирконием, легкими РЗЭ и обедненностью алуминием.

4. Установленная петрохимическая дискретность серий высокомагнезиальных магматитов отчетливо проявляется в металлогенической и минерогенической специализации последних,

что подтверждается анализом магматизма более 20 выделенных разновозрастных металлогенических зон и узлов на территории Балтийского щита. Поэтому обоснование сериальной принадлежности высокомагнезиальных магматитов выдвигается в качестве важного петролого-геохимического критерия их потенциальной рудоносности и должно учитываться при прогнозировании и поисках соответствующих полезных ископаемых.

Научная новизна. 1. Предложено разделение высокомагнезиальных магматитов щита на четыре серии: бонинитовую, коматиитовую, толеитовую и щелочно-ультрамафитовую с использованием новой базовой тройной диаграммы  $Al_2O_3$ - $10xTiO_2$ - $MgO$  и отношения  $Al_2O_3/TiO_2$ . Показана решающая роль состава выплавленного мантийного субстрата в формировании соответствующих серий. Предложена классификация пород коматиитовой серии на основе диаграммы  $MgO$ - $TiO_2$  с выделением 3 видов: коматииты, высокомагнезиальные коматиитовые базальты (ВКБ) и низкомагнезиальные коматиитовые базальты (НКБ).

2. Впервые для всей территории Кольско-Лапландско-Карельской провинции (КЛКП) Балтийского щита показана связь высокомагнезиального магматизма раннего докембрия с эволюционирующими во времени структурами рифтогенного типа: рифтоидами позднего архея (3.1–2.9 млрд. лет), протоавлакогенами в раннем карелии (2.5–2.4 млрд. лет) и проторифтами в среднем карелии (2.05–1.97 млрд. лет). Проведена типизация и выявлена эволюция форм развития высокомагнезиальных магматитов от полигональной через ортогональную к линейной. Выдвинуто положение о связи этой эволюции с изменением форм и размеров конвектирующих ячеек в остывающей докембрийской астеносфере.

3. Впервые выделен, обоснован и описан наиболее крупный в фундаменте Восточно-Европейской платформы Сумозерско-Кенозерский зеленокаменный пояс позднего архея с широким проявлением высокомагнезиального магматизма.

4. На основе анализа пространственного размещения магнитных аномалий в зоне Онежское озеро — Рыбинское водохранилище (в том числе под чехлом фанерозоя, венда и вепися) с учетом связи их с ультрамафитами и мафитами раннего протерозоя, а также сходства магматизма данной зоны с проторифтогенными структурами щита впервые прогнозируется существова-



ние в ней в среднекаральское время Онегозерско-Рыбинского проторифта.

5. Разработаны новые стратиграфические схемы архея и протерозоя юго-восточной окраины Балтийского щита (район развития датированных древнейших образований) и нижнего протерозоя Куолаярвинской структуры (ключевой район для корреляции протерозойских образований Карелии, Финляндии и Кольского полуострова) и определено положение в них высокомагнезиальных магматитов. Впервые в соавторстве с коллегами на ЮВ окраине Балтийского щита установлены древнейшие высокомагнезиальные вулканы в саамис возрастом около 3,4 млрд. лет (Черевская структура), лопии — 2.9 млрд. лет (Сумозерско-Кенозерский пояс), сумии — 2.45 млрд. лет (Шардозерская и Киричская структуры). Разработки использованы при составлении РМСК Северо-Запада СССР региональной стратиграфической схемы докембрия Карело-Кольского региона и шкалы докембрия СССР.

6. Среди высокомагнезиальных вулканических свиты Ветреный Пояс впервые на Балтийском щите описаны дифференцированные (расслоенные) покровы, предложена модель их формирования с учетом проведенных экспериментальных работ.

7. На основе анализа распределения РЗЭ, а также ряда петрогенных элементов в высокомагнезиальных вулканических докембрия районов Ветреного Пояса, Печенги и Финляндии в соавторстве с коллегами сделан вывод о неоднородности мантии и ее преобразованиях на рубеже архея и протерозоя, а также на некоторых этапах раннего протерозоя.

Практическая ценность. I. Первые находки автором коматитов лопии с несомненными признаками их эффузивной природы в Токшинской структуре Сумозерско-Кенозерского зеленокаменного пояса послужили базой для выявления и детального изучения подобных пород в других лопийских поясах Карелии (Ведлозерско-Сегозерском, Пибозерско-Тикшозерском, а также в Костомукшской и других структурах). Комплекс высокомагнезиальных вулканических приобрел значение типоморфного для лопийских зеленокаменных поясов, что нашло отражение в практике геологических исследований, в новых легендах и различных геологических картах региона.

2. Выявленная связь никелевого оруденения с коматитами

позволяет более реально оценивать перспективы ряда структур Сумозерско-Кенозерского и других зеленокаменных поясов на медно-никелевые руды.

3. На основе новых геологических и петрохимических данных сделан вывод о перспективности на медно-никелевые руды. потребленных под калевийским и вепсийскими образованиями интрузивных ультрамафитов толеитовой серии раннего протерозоя в Онежской структуре (Онегозерско-Рыбинский проторифт).

4. На основе анализа пространственного размещения мафит-ультрамафитов на ЮВ окраине щита впервые выделена перспективная на хромиты и платиноиды Бураковско-Монастырская зона расчлененных массивов раннего карелия.

5. Полученный в процессе исследования материал использован при составлении трех среднемасштабных геологических и прогнозных карт Ветреного Пояса и его обрамления, среднемасштабной геологической карты Пана-Куолаярвинского синклинория, четырех мелкомасштабных (1:500000-1:1500000) карт Карельского региона (геологической, геохимической, магматических формаций, полезных ископаемых), а также изложен в семи отчетах Института геологии Карельского филиала АН СССР и Карельской КГРЭ ИГО "Севзапгеология" и 4 рекомендациях ИГО "Севзапгеология" и "Архангельскгеология". Результаты исследований использовались производственными организациями при геолого-съемочных и поисковых работах на Ветреном Поясе, Куолаярвинской и Онежской структурах, в том числе финскими геологами при изучении западного крыла Куолаярвинской структуры.

Публикация и апробация работы. Основные результаты данной работы были доложены на 27 МК (Москва, 1984), X международном геохимическом симпозиуме (Хельсинки, 1983), международном семинаре по геологии докембрия (Дулут, 1990), Советско-финляндском симпозиуме по геологии ятулия (Куусамо, 1979), IV Всесоюзном совещании по петрографии (Ленинград, 1982), II, III, IV Всесоюзных палеовулканических симпозиумах (Петрозаводск, 1975; Хабаровск, 1978; Черкассы, 1981), I, II, III Всесоюзных симпозиумах по ультрамафитам (Новосибирск, 1979; Владивосток, 1983; Хромтау, 1985), II Всесоюзном совещании по никелю (Апатиты, 1987) и II Всесоюзном совещании по металлогении докембрия (Ленинград, 1985), Всесоюзном семинаре "Высокомагнезиальный магматизм раннего докембрия" (Петрозаводск,

1988), симпозиуме "Магматические формации в геологической истории и структуре Земли" (Свердловск, 1989), а также в ряде региональных симпозиумов и совещаний. По теме диссертации опубликовано более 40 статей, свыше 30 тезисов в материалах международных и всесоюзных совещаний, симпозиумов, ряд глав в 7 коллективных монографиях, в том числе наиболее полно в монографии "Коматииты и высокомагнезиальные вулканиты раннего докембрия Балтийского щита" (1988).

**Объем работы.** Диссертация состоит из 7 глав, предисловия, введения и заключения, содержит 234 стр. машинописного текста, список литературы из 332 наименований, 85 рисунков и 16 таблиц.

**Благодарности.** В процессе работы над диссертацией автор пользовался советами и доброжелательной поддержкой О.А. Богатикова, И.Д. Рябчикова, С.И. Рыбакова, А.И. Богачева, В.А. Соколова; различные аспекты геологии докембрия и петрологии и пути их решения неоднократно обсуждались с А.Б. Вревским, А.В. Гирнисом, В.Г. Загородным, В.И. Кочневым-Первуховым, Е.Е. Лазько, С.Б. Лобач-Жученко, Б.И. Малюком, Е.Е. Милановским, Н.П. Михайловым, А.А. Сивороновым, А.К. Симоном, В.Ф. Смолькиным, К.А. Шуркиным, Ю.Н. Яковлевым, финскими геологами Т. Алапиети, А. Сильвеннойненом, П. Растасом, Е. Хански. Автор благодарен геологам ШГО "Севзапгеология" А.В. Федюку и В.Н. Фурману, ШГО "Архангельскгеология" С.А. Мелкуману, А.А. Черепанову, А.И. Зудину за содействие в проведении полевых работ.

Глубокую признательность автор выражает В.В. Куликовой, постоянно способствовавшей проведению полевых работ и исследований, совместному решению ряда геологических вопросов на ЮВ окраине Балтийского щита, а также коллегам по Институту геологии: А.И. Голубеву, В.Я. Горьковцу, Ю.К. Калинин, М.М. Лаврову, М.Б. Раевской, В.И. Робонену, А.П. Светову, А.И. Световой, Л.П. Свириденко, В.Д. Слюсареву, М.М. Стенарю, В.С. Степанову, Ю.И. Сустре, Р.А. Хазову, К.И. Хейсканену, чьи критические замечания и товарищеские пожелания использованы при написании работы. Выполнением современных видов анализов автор обязан П. Саддеби (Англия), Д.З. Журавлеву, И.А. Пухтелю, А.Н. Плаксенко и В.Ф. Смолькину.

## ВВЕДЕНИЕ. АССОЦИАЦИИ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ МАГМАТИТОВ

Геологи давно заняты поисками таких индикаторных совокупностей магматических горных пород, которые отражали бы определенные геодинамические обстановки их формирования, связанные с соответствующими стадиями эволюции литосферы и обладали бы своей металлогенической спецификой, применяя два подхода — формационный и сериальный. При формационном подходе Ю.А. Кузнецов, Е.К. Устиев и другие исследователи магматическую формацию рассматривают как частный случай или составную часть геологической формации. При изучении докембрийского магматизма формационный подход особенно широкое распространение получил среди советских исследователей (К.А. Шуркин, Ф.П. Митрофанов, И.В. Бельков, А.И. Богачев, Н.М. Чернышов и многие другие), где объектом исследований являются магматические комплексы, совокупности однотипных комплексов — отдельные магматические формации, а также различные сообщества таких формаций.

При сериальном подходе О.А. Богатиков, В.И. Коваленко, А.М. Борсук (1987) выделяют абстрактные (петрохимические) и конкретные серии магматических пород. Последние понимаются как частный случай (со всеми специфическими чертами) абстрактной серии и объединяют "совокупность пород, образованных при сходных физико-химических параметрах, подчиняющихся трендам дифференциации единых родоначальных магм.". Выделение и классификация серий не является общепринятой. Наиболее известны традиционные серии: толеитовая, известково-щелочная и щелочно-базальтовая.

Фактический материал, полученный при изучении докембрийских регионов, а также вулканизма фанерозоя (в том числе океанического) за последние 20 лет, свидетельствует о значительном развитии высокомагнезиальных вулканитов различной сериальной принадлежности. Одни исследователи рассматривают их в качестве высокомагнезиальных субсерий традиционных серий (Шарков и др.; 1987), а другие выделяют в самостоятельные серии (Viljoen, Viljoen, 1969; Arndt, 1977; Куликова, Куликов, 1981; Кекежинская, Добрецов, 1983, и др.). Автор высокомагнезиальные магматиты Балтийского щита относит к четырем



сериям: бонинитовой, коматиитовой, толеитовой и щелочно-ультрамафитовой (щелочно-магнезиальной). Для разделения серий предлагается тройная диаграмма  $Al_2O_3$ - $10xTiO_2$ - $MgO$  (Куликов, 1988), в которой отмечается последовательное уменьшение отношения  $Al_2O_3/TiO_2$  от бонинитовой серии ( $>30$ ) к коматиитовой ( $30-10$ ), толеитовой ( $10-3.3$ ) и щелочно-ультрамафитовой ( $<3.3$ ). Указанные граничные значения  $Al_2O_3/TiO_2$ , как правило, можно использовать для разделения высокомагнезиальных вулканитов и других регионов независимо от возраста пород. Данная закономерность, устанавливаемая на природных объектах, удовлетворительно коррелируется с результатами экспериментов по плавлению различных перидотитов (Jaguen, Green, 1980; Mysen, Kushiro, 1977; Fallon et al., 1989 и др.) как вероятных мантийных субстратов. Составы выплавов, полученные при различных  $PT$  условиях и степенях плавления за исключением очень низкой степени, образуют тренды в соответствующих сериальных полях диаграммы  $Al_2O_3$ - $10xTiO_2$ - $MgO$ , отражая важнейшую зависимость сериальности высокомагнезиальных магматитов от выплавляемого субстрата.

Для докембрия Балтийского щита из названных высокомагнезиальных серий наибольшее распространение получила коматиитовая, впервые выделенная братьями М. и Р. Вильонами в 1969 году в КАР. Под коматиитовой серией понимается ассоциация мафит-ультрамафитовых магматитов, сформированная из ультраосновной магмы нормальной щелочности и характеризующаяся повышенными значениями кремнезема и магнезии, а также близкими к хондритовым отношениями нелетучих литофильных ( $Al$ ,  $Ca$ ,  $Ti$ ) и большинства редкоземельных элементов. Она включает 3 главных вида пород: коматиит ( $MgO > 24\%$  в пересчете на безводный остаток), ВКБ ( $14-24\% MgO$ ) и НКБ ( $9-14\% MgO$ ). Принимая коматиит за ультраосновную породу ( $SiO_2 < 45\%$ ), следует признать нижнюю границу в  $18\% MgO$ , рекомендованную Пенроузской конференцией (Komatiites, 1982), заниженной, т.к. наши данные показывают, что  $90\%$  вулканитов коматиитовой серии, содержащих  $MgO$  от  $18$  до  $24\%$ , имеют  $SiO_2 > 45\%$  и, следовательно, принадлежат к группе основных пород.

## Глава I. ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ СТРОЕНИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА И ПОЛОЖЕНИЕ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ МАГМАТИТОВ РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ.

В пределах щита отчетливо выделяются три крупные провинции (Земная кора..., 1987; Gaal, Gorbachev, 1978; Загородный, Радченко, 1987, и др.): Кольско-Лапландско-Карельская (КЛКП), Свекофеннская (СП), Дальсландская (ДП). КЛКП включает Карело-Кольский регион СССР, за исключением Приладожья, а также северные районы Финляндии, Швеции и Норвегии. СП занимает районы Советского Приладожья, Южной и Юго-Западной Финляндии, Центральной Швеции, Центральной Норвегии. К ДП относятся районы Юго-Западной Швеции и Норвегии.

Каждая из провинций характеризуется своими особенностями строения и различным временем окончательной кратонизации коры, что связано с миграцией завершающих эпох формирования коры континентального типа с северо-востока щита (поздний архей) к центру (ранний протерозой) и юго-западу (поздний протерозой).

При тектоническом районировании КЛКП, являющейся наиболее благоприятной для изучения вследствие сохранности разновозрастных (от раннего архея до рифея и венда) докембрийских образований, многие исследователи, в т.ч. и автор, с определенными вариациями выделяют три крупные мегазоны (геоблока): Карельскую, Беломорскую и Кольскую.

История формирования КЛКП неоднократно пересматривалась в зависимости от стратиграфических и тектонических позиций исследователей. В работе за основу принимается стратиграфическая схема докембрия, разработанная с участием автора для Карелии (Геология Карелии, 1987). В соответствии с ней выделяется 4 крупных стратиграфических комплекса: нижнеархейский - саамский (древнее  $3.4 \pm 0.2$  млрд. лет), верхнеархейский - лопийский ( $3.4 \pm 0.2 - 2.6 \pm 0.1$  млрд. лет), нижнепротерозойский - карельский ( $2.6 \pm 0.1 - 1.65 \pm 0.05$  млрд. лет) и верхнепротерозойский - рифейский ( $1.65 \pm 0.05 - 0.62 \pm 0.01$  млрд. лет), которые отличаются специфическими тектоническими режимами их формирования, отражающими необратимость развития Земли в докембрии.

В докембрии Балтийского щита установлено не менее 10

фаз проявления высокомагнезиального магматизма, фиксируемых в соответствующих надгоризонтах (стадиях) тектоно-магматических эпох. В саамской эпохе выделяется одна, лопийской — три, карельской — пять, рифейской — одна.

Проведенный формационный анализ магматитов раннего докембрия щита позволяет выделить более 15 вулканогенных и более 20 интрузивных комплексов, содержащих высокомагнезиальные породы (табл. ). Большинство интрузивных комплексов имеют свои вулканогенные комагматы.

## Глава 2. ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫЙ МАГМАТИЗМ РАННЕГО АРХЕЯ

По ряду признаков реликты саамской коры отмечены в пределах Беломорской мегазоны, Мурманского блока Кольской мегазоны, а также Водлозерского, Вокнаволоцкого, Ондозерского и других более мелких блоков Карельской мегазоны, расположенных между лопийскими зеленокаменными поясами.

Беломорская мегазона сложена преимущественно одноименной серией, состоящей из трех толщ (свит): керетской, хетоламбинской и чупинской (Геология Карелии, 1987). В ассоциации с амфиболитами в хетоламбинской толще встречаются бесполевошатовые породы, которые традиционно считаются интрузивными ультрамафитами (Степанов, 1981). Они представлены метапериодитами и бронзитами. Ультрамафиты, часть из которых, вероятно, является метаморфизованными коматитами, составляют не более 3–5% объема амфиболитовых пачек.

В Карельской мегазоне высокомагнезиальные амфиболиты и серпентин-амфиболовые породы (метаморфизованные НКБ и коматиты) — выявлены в восточной части Водлозерского блока, где они слагают 4 пачки мощностью до 15 м. среди амфиболитов волоцкой толщи (Куликов, Куликова, 1986) и в различной степени гранитизированы. В пределах этих пачек В.В.Куликовой в 1987 году выделены отдельные маломощные потоки с дифференцированным строением. Модельный  $Sm-Nd$  возраст ассоциации метапироксенит-метагаббро-анортозиты в районе Лайручъя (центральная часть блока), определенный ИГЕМ АН СССР, составляет 3.31–3.53 млрд. лет (Куликов и др., в печати). Эта ассоциация, вероятно, завершает саамский основной магматизм в районе, а

вмещающая ее волоцкая толща с высокомагнезиальными магматитами с возрастом  $3.39 \pm 0.076$  млрд. лет (Пухтель и др., в печати) является древнейшей на щите (по крайней мере в ее КВ части). Возраст древнейших тоналитов Водлозерского блока равен 3.6–3.2 млрд. лет (Сергеев и др., 1990). Волоцкая толща может коррелироваться с ассоциацией Акилия в Гренландии (3.8 млрд. лет; Nurman, Bridgwater), амфиболитами штата Миннесота (США), а также аульской серией УКЩ, где  $Sm-Nd$  возраст метакomatитов оценивается в 3.9 млрд. лет (Журавлев и др., 1988).

## Глава 3. ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫЙ МАГМАТИЗМ ПОЗДНЕГО АРХЕЯ

На Балтийском щите позднеархейская (лопийская) эпоха является одной из главных по интенсивности высокомагнезиального магмопроявления. В КЛКП ультрамафитовый магматизм сосредоточен в основном в пределах 7 зеленокаменных поясов (Колмозеро-Воронья, Терско-Аллареченском, Тунтса-Савукоски, Тикшозерско-Пебозерском, Суомуссалми-Кухмо, Ведлозерско-Сегозерском, Сумозерско-Кенозерском, Южно-Выгозерском), а также ряде зеленокаменных структур (Костомукшской, Иломанси, Сарвисоайва и др.). Под зеленокаменными поясами понимаются крупные архейские структуры рифтогенного типа с мощным проявлением мантийного магматизма, прошедшие многостадийную историю развития (Конди, 1983; Миллер, 1989, и др.). В современном эрозионном срезе они фиксируются главным образом по зонам развития интрузивных гипербазитов, реликтам вулканических центров, реликтам структур с большими (до 1 км. и более) мощностями мафит-ультрамафитовых вулканитов. Среди исследователей не существует единой точки зрения на генезис зеленокаменных поясов, что находит отражение и в названии этих структур: рифтоиды (Чекунов, 1986), авлакогеосинклинали (Милановский, 1981), прототгеосинклинали (Рыбаков, 1987, и др.).

Формирование и развитие лопийских зеленокаменных поясов на Балтийском щите произошло в период 3.2–2.8 млрд. лет. Они образуют некую единую систему, которая прослеживается в фундаменте Восточно-Европейской платформы на протяжении 3 тыс. км от Черного до Баренцева моря (Куликов и др., 1984, Зеленокаменные..., 1988). Высокомагнезиальный магматизм в пределах каждого зеленокаменного пояса имеет свои отличительные черты.



Наиболее крупный Сумозерско-Кенозерский пояс (Куликов, Куликова, 1978) расположен на КВ окраине Балтийского щита и протягивается на расстояние более 350 км при ширине до 50 км. Он сложен вожминской серией, состоящей из 7 толщ (Куликов и др., 1983): кочминской, савинской, кумбуксинской, каменноозерской, вожозерской и варозерской, общей мощностью не менее 6 км. Геохронологические данные С.Б.Лобач-Жученко (1988) свидетельствуют о формировании кислых вулканитов каменноозерской толщи в период около 2.9 млрд. лет (Rb-Rb метод по циркону). Высокомагнезиальные вулканиты установлены в савинской и кумбуксинской толщах. В первой, имеющей мощность не менее 500 м, содержится более 5 тел ультрамафитов мощностью от 5 до 75 м, переслаивающихся главным образом с туфогенно-осадочными, в т.ч. углеродсодержащими, породами. В кумбуксинской толще (500-1000 м), отличающейся существенно вулканогенным типом разреза, встречено не менее 8 потоков НКБ и коматиитов мощностью от 10 до 100 м. Среди них встречаются потоки, где отчетливо выделяется три зоны: кумулятивная, спинифексная, брекчиевидная (Куликова, Куликов, 1981). На участке Миллеритовом (р.Кумбукса) известно овальное тело серпентинитов (до 50 м), которое, вероятно, выполняет один из подводящих каналов.

В качестве интрузивных коматитов коматиитов рассматриваются силлоподобные и дайковые тела ультрамафитов, развитые в пределах зеленокаменного пояса и его обрамления. Наиболее крупные ультрамафитовые тела развиты в Каменноозерской структуре (Вожминские, Лебяжинское, Светлоозерские, Лексинское). Они ранее рассматривались как дайкообразные (Медно-никелевые..., 1985). По мнению автора, с учетом новых материалов следует выделять штокообразное Лексинское тело и 5 крупных силлов длиной до 13 км, при мощности до 1 км. Вожминский силл имеет крутое падение (70-80°), а Лебяжинский - умеренное (до 45°). В строении Восточно-Вожминского тела принимают участие породы двух интрузивных фаз (Земная кора..., 1983). Первая представлена преимущественно оливинитами с подчиненным количеством лерцолитов и верлитов, а вторая - дифференцированными дайками, состоящими из верлитов, клинопироксенитов, габбро. Лебяжинский силл характеризуется дифференцированным строением, обусловленным сменой вверх по разрезу оливинитов пироксеновыми оливинитами, пироксенитами и габбро. Габброиды

занимают около четверти объема интрузии.

Из тел, расположенных за пределами пояса, наиболее крупным является Винельская дайка ультрамафитов, рассекающая на протяжении 15 км сложнослоистые амфиболиты волоцкой толщи и имеющая мощность до 300 м. Она прорывается жилами риодацитов и пегматитов, при этом последние имеют K/Ar возраст по мусковиту около 2.7 млрд. лет (Куликов и др., 1987).

В работе даются также на основе личных наблюдений и с использованием литературных источников краткие геолого-петрографические характеристики в различной степени метаморфизованных пород следующих поясов: Ведлозерско-Сегозерского, Суомуссалми-Кухмо, Колмозеро-Воронья, Южно-Выгозерского и Терско-Аллареченского, а также Костомукшской структуры.

Анализ и обобщение материалов по геологии позднего архея позволяют сделать следующие выводы. 1. Высокомагнезиальные магматиты (лавы, туфы и их интрузивные коматиты) типичны для всех выделяемых лопийских зеленокаменных поясов Балтийского щита, они формируются в рифтоидную стадию развития и слагают от 3 до 12% разрезов, приурочиваясь к нижним и средним их частям. Подобные показатели характерны также для зеленокаменных поясов Родезии (Конди, 1983), которые занимают промежуточное положение между канадскими (3-4%) и австралийскими (23%) поясами.

2. Схожие черты строения и эволюции, практически единый возраст зеленокаменных поясов Балтийского щита свидетельствуют о наличии в лопии общей системы, объединяющей и регулирующей закономерности их развития, которая, вероятно, существовала в условиях сравнительно тонкой литосферы над конвектирующей астеносферой.

3. Специфика высокомагнезиального магматизма отдельных поясов заключается в различном объеме и стратиграфическом уровне его проявления (1-3 фазы), а также фациальных особенностях.

#### Глава 4. ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫЙ МАГМАТИЗМ РАННЕГО ПРОТЕРОЗОЯ

Карельская эпоха продолжительностью более 900 млн. лет разделяется на три крупных этапа: раннекарельский, среднекарельский и позднекарельский (Геология Карелии, 1987).

Раннекарельский этап характеризуется протоавлакогенной стадией развития Фенно-Сарматской протоплатформы. По сохранившимся реликтам вулканогенных и осадочных образований сумия-сариолия, а также пространственному распространению расслоенных массивов перидотит-габброноритовой формации выделяются следующие протоавлакогенные структуры: Печенгско-Варзугская, Ботническо-Кукасозерская, Восточно-Карельская, Центральнo-Карельская, а также намечаются Восточно-Финляндская, Бураковско-Монастырская и Лапландская.

Вулканические фации высокомагнезиального магматизма проявились в Печенгско-Варзугском, Восточно-Карельском и Лапландском протоавлакогенах. В первом они представлены лавовыми потоками НКБ и ВКБ в составе сейдореченской и полисарской свит (Имандра-Варзугская ..., 1982; Федотов и др., 1985), а во втором — киричской свиты (Куликов, Куликова, 1982) в основном в пределах Киричской и Лумбасручейской вулкано-структур, а также Шардозерской мульды.

В последние годы высокомагнезиальные вулканические коматиитовой серии раннекарельского возраста выявлены в Северной Карелии, Финской и Норвежской Лапландии (Кожевников и др., 1989; Solli, 1983; Lehtonen et al., 1989).

В качестве интрузивных комагматов раннекарельских вулканических автор рассматривает породы мафит-ультрамафитовых (в том числе некоторых расслоенных массивов), сформировавшихся на Балтийском щите в интервале 2.4–2.5 млрд. лет. В этот же период, очевидно, внедрялись и интрузии лерцолит-габброноритового комплекса Беломорской метазоны (Степанов, 1981).

Среднекарельский этап характеризует протоплитную стадию развития протоплатформы. Высокомагнезиальный магматизм проявился в ятулийское и людиловское время. В ятулии высокомагнезиальные магматиты развиты весьма ограниченно и рассматриваются в качестве дифференциатов толеитовой магмы. Единичные потоки главным образом авгитофировых базальтов иногда с повышенной щелочностью известны в составе умбинской и куэстярвинской свит на Кольском полуострове (Вулканизм..., 1967) и сегозерской серии в Карелии (Попов и др., 1983).

В людиловское время высокомагнезиальный магматизм в КЛКП достигает апогея своего развития, концентрируясь в пяти проторифтах: Печенгско-Варзугском, Лапландском, Ветреный Пояс, Кайнуу-Оутокумпу и предполагаемом Онегозерско-Рыбин-

ском. Проторифт Ветреный Пояс характеризуется наибольшими объемами высокомагнезиальных продуктов вулканической (более 10 тыс. км<sup>3</sup>) и плутонической фаций (более 200 тел). Учитывая слабый метаморфизм вулканических на ряде участков, сохранность первичных минералов, разнообразие лавовых потоков, этот район рассматривается как базовый при разработке петрологических моделей высокомагнезиального магматизма в докембрии Балтийского щита. Среди лавовых покровов выделяется два главных типа: недифференцированные и дифференцированные. Первые (1–50 м) сложены НКБ или ВКБ с подушечной, миндалекаменной или массивной текстурой. В наиболее полных разрезах (25–75 м) дифференцированных покровов выделяется 4 зоны: кумулятивная, надкумулятивная, полосчатая и кровельная. Кумулятивная зона образована коматиитами, реже ВКБ с порфировой структурой, надкумулятивная — НКБ (плагипроксениты, реже проксениты НКБ) полосчатая — ВКБ и НКБ со структурой спинифекс, а кровельная — ВКБ или НКБ с подушечной или брекчиевидной текстурой. Высокомагнезиальные вулканические выполняют также трубки взрыва, реже дайки при весьма ограниченном развитии пирокластики. Интрузивные аналоги коматиитов и коматиитовых базальтов представлены габброидами, габброноритами, перидотитами. Известны как тела простого сложения, так и дифференцированные; в наиболее полных разрезах последних выделяются (снизу вверх): оливиниты перидотиты-перидотиты (полевошпатовые лерцолиты) — оливиниты габбронориты-вебстериты-габбро (габбронориты) — кварцевые габбро-гранофиры. Положение интрузивных образований контролируется системами продольных и поперечных разломов в рифтогенной структуре.

В Онежской структуре высокомагнезиальные вулканические толеитовой серии известны в составе суйсарской свиты (Левинсон-Лессинг, 1888; Гилярова, 1941; Светов, 1979; Коматииты..., 1989, и др.). Они слагают лавовые потоки пикритов, пикробазальтов, оливинитовых и проксенитовых базальтов, а также прослои пирокластов. Интрузивные комагматы вскрыты эрозией ограниченно (Кончезерский и Терноволоский силлы). Выделяется две вулканические зоны, вытянутые в северо-западном направлении: Укшозерская и Кондопожская. По контурам магнитных аномалий под фанерозойским чехлом Русской плиты, прослеживающихся от



Онежского озера до Рыбинского водохранилища (Берковский и др., 1978) и фактически расположенных на продолжении данных вулканических зон, впервые высказывается предположение о существовании в лудиковийское время Онегосерско-Рыбинской рифтогенной структуры, сопоставимой по масштабам с проторифтами Ветреный Пояс, Печенгско-Варзугским и другими. В ней Онежская структура рассматривается как его краевая северо-западная часть.

В диссертации кратко приводится описание высокомагнезиальных пород также в проторифтах Лапландском (Кукаозеро-Куолаярви-Карасйок), Печенгско-Варзугском и Кайнуу-Оутокумпу.

Позднекарельский этап отличается резко дифференцированным тектоническим режимом: протогеосинклинальным в СП и платформенным в КЛКП. Ультрамафиты приурочены в основном к поясам Коталахти, Шеллефте, Кюльмякоски и другим в СП, а также в Печенгско-Варзугской и, вероятно, Лапландско-Беломорской зонах КЛКП. В поясах СП в основном за пределами СССР ультрамафиты находятся в тесной ассоциации с габброидами и реже диоритами. Обычно они слагают трубообразные тела. Вулканыты в виде единичных потоков НКБ и ВКБ или их туфов отмечены в районе Шеллефте (Медно-никелевые..., 1985) и Южной Финляндии (Kousa, 1985). В КЛКП к верхнекарельским образованиям отнесены пикробазальты южнопеченгской и томингской серий и их интрузивные аналоги, некоторые интрузивные мафит-ультрамафиты, развитые в пределах гранулитового комплекса, а также ультрамафиты многофазных щелочных массивов Гремяча-Вырмес на Кольском полуострове и Тикшеозерского и Елетьозерского в Северной Карелии, которые фиксируют первые проявления щелочного магматизма на Балтийском щите в интервале 1,9-1,8 млрд. лет (Кухаренко, 1968).

Анализ и обобщение материалов по геологии раннего протерозоя позволяют сделать следующие выводы. I. Наблюдается устойчивая связь высокомагнезиальных магматитов со структурами рифтогенного типа, заложение которых происходило в протавлакогенный этап развития Фенно-Сарматской протоплатформы. На протоплитной стадии некоторые из образованных структур утратили свою автономность, а другие получили новый импульс активности на ее завершении (лудиковий) с максимальным про-

явлением ультрамафитов. В позднем карелии рифтогенные зоны испытывают сжатие и прекращают свое развитие, а высокомагнезиальный магматизм приобретает щелочной характер.

2. В СП мафит-ультрамафитовый магматизм позднего карелии характеризуется приуроченностью к новой системе проницаемых зон, которые практически не связаны с ранне- и среднекарельскими рифтогенными системами. Это свидетельствует о существенной перестройке в астеносфере данной провинции. Высокомагнезиальный магматизм проявлялся преимущественно в интрузивной форме.

3. Доля продуктов высокомагнезиального вулканизма в общем объеме супракrustальных образований нижнего протерозоя колеблется от 2% в Онежской структуре до 40% в проторифте Ветреный Пояс, в среднем для КЛКП она составляла порядка 12%, а СП- 1%.

Вулканизм носил явные черты трещинного типа на начальных этапах и затем сменялся центральным типом.

4. Каждая рифтогенная структура имеет свои неповторимые черты внутреннего строения и вещественного состава, отражающие автономность их развития.

## Глава 5. ПЕТРОХИМИЯ И ГЕОХИМИЯ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ МАГМАТИТОВ РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ

В работе дается характеристика высокомагнезиальных магматитов (преимущественно вулканитов) раннего докембрия с позиций их серийной принадлежности и эволюции в пространстве и времени. При этом принимается в целом изохимический характер регионального метаморфизма за исключением щелочей и некоторых элементов примесей (Конди, 1981; Гирнис и др., 1987). Проведены кластерный, факторный и пошаговый дискриминантный анализы совокупности (около 500 отдельно по коматитам, ВКБ, НКБ) типовых районов развития докембрия (Балтийский щит, Канада, ЮАР, Зимбабве, Зап. Австралия) по 13 переменным ( $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $NiO$ ).

В таблице указана выявленная серийная принадлежность высокомагнезиальных магматитов для отдельных их фаз проявления.

В архее резко преобладает коматиитовая серия при весьма ограниченном развитии толеитовой (волоцкий и каскадский комплексы). Лопийские коматииты Балтийского щита по данным пошагового дискриминантного анализа отличаются по фактору — II (щелочи, титан, кальций) от разновозрастных аналогов Ю. Африки, Канады и Австралии.

Интрузивные ультрамафиты различных зеленокаменных поясов, как и вулканы, отчетливо разделяются на две серии: толеитовую и коматиитовую. Первая характеризуется повышенным содержанием железа и титана, развита ограниченно в основном в пределах Беломорской мегазоны (Аллареченская структура, оз. Б. Крохино).

Высокомagneзиальные вулканы раннего протерозоя относятся к коматиитовой и толеитовой сериям, причем по сравнению с археем доля последней существенно возрастает, особенно в лодиковии, где в двух из пяти протори́тах высокомagneзиальный магматизм представлен именно толеитовой серией. Коматииты раннего протерозоя наибольшее развитие получили в Лапландском протори́те и ограниченное — на Ветреном Поясе. В целом они по сравнению с лопийскими менее мгнезиальные, но более железистые и титанистые. Эта особенность характерна также для ВКБ и НКБ. Наиболее мгнезиальные породы толеитовой серии (пикриты и пикробазальты) соответствуют по  $MgO$  ВКБ, но в первых более высокие содержания  $FeO$ ,  $TiO_2$ , меньше  $SiO_2$  и низкие отношения  $Al_2O_3/TiO_2$  и  $CaO/TiO_2$ .

Интрузивные ультрамафиты раннего протерозоя относятся к четырем петрохимическим сериям: бонинитовой, коматиитовой, толеитовой и щелочно-ультрамафитовой, при этом породы коматиитовой серии в протори́тах Ветреный Пояс и Лапландском пространственно связаны с соответствующими вулканами. К данной серии по петрохимическим параметрам (низкая железистость, титанистость и щелочность, а также высокая мгнезиальность) следует относить и породы некоторых расслоенных массивов раннего карелия (Бураковский, Монастырский). Петрохимические параметры других расслоенных массивов (Пеникат, Кивакка и др.) больше соответствуют бонинитовой серии (Alapieti, 1989).

Толеитовая серия представлена интрузиями печенгского никеленосного комплекса и суйсарского комплекса Онежской струк-

туры. Для этих пород характерны низкие отношения  $Al_2O_3/TiO_2$ ,  $CaO/TiO_2$ .

Интрузивные породы щелочно-ультрамафитовой серии в массивах Гремяха-Вьрмес, Елетьозерском и Тикшеозерском характеризуются высокими содержаниями щелочей, железа,  $TiO_2$  (до 7–8%), очень низкими отношениями  $Al_2O_3/TiO_2$ ,  $CaO/TiO_2$ .

Общая тенденция геохимической эволюции высокомagneзиального магматизма раннего докембрия Балтийского щита рассматривается на примере его юго-восточной окраины. В высокомagneзиальных вулканах отмечаются следующие закономерности распределения литофильных элементов в зависимости от возраста (соответственно саамий, лопий, сумий и лодиковий в г/т: Ba-44,35,450,200; Sr-51,65,275,185; Li-40,6,45,13; Rb-1,10,25,15), отражающие контаминирующее влияние более мощной протерозойской коры. В отношении ванадия вулканы равной мгнезиальности архея и протерозоя ЮВ окраины Балтийского щита практически не различаются. В то же время отчетливо фиксируются пониженные значения никеля в вулканах равной мгнезиальности у среднекарельских пород по сравнению с лопийскими. Максимальные концентрации  $Cr_2O_3$  отмечаются у пород с содержанием  $MgO$  22–26%, а также в НКБ киричской свиты.

Спектры РЗЭ вулканитов архея и протерозоя имеют различную тенденцию. В лопийских образованиях более ранние коматиитовые базальты кумбуксинской толщи обеднены легкими РЗЭ, а вулканы более молодой возмозерской характеризуются хондритовыми отношениями. В карельских образованиях (сумий и лодиковий) за исключением Лапландии не наблюдается существенных различий в спектрах РЗЭ, однако заметное обогащение их легкими РЗЭ по сравнению с хондритом и лопийскими вулканами свидетельствует о различном источнике происхождения.

Анализ петро- и геохимических особенностей высокомagneзиальных магматитов позволяет сделать следующие выводы: I. Петрохимические параметры высокомagneзиальных магматитов раннего докембрия Балтийского щита свидетельствуют о принадлежности их к четырем петрохимическим сериям: бонинитовой, коматиитовой, толеитовой и щелочно-ультрамафитовой. При этом серийная принадлежность отражает генетическое единство вулканитов и плутонов. Каждая конкретная петрохимическая серия имеет



свою региональную специфику.

2. В целом для высокомагнезиального магматизма Балтийского щита устанавливается смена максимумов проявления петрохимических серий от коматиитовой (архей) к толеитовой (ранний протерозой) и щелочно-ультрамафитовой (поздний протерозой).

3. Коматииты протерозоя по сравнению с археем становятся более титанистыми, железистыми и глиноземистыми, но менее магнезиальными, а ВКБ и НКБ — более титанистыми и глиноземистыми.

4. Данные РЗЭ независимо от сериальной принадлежности высокомагнезиальных пород свидетельствуют об обогащенности легкими РЗЭ и Zr протерозойских образований по сравнению с архейскими, и подтверждают вывод о существенном преобразовании примитивной мантии на рубеже архея и протерозоя под Балтийским щитом (Рябчиков и др., 1986).

5. На примере Печенгской и Каменноозерской структур выявлена закономерность, заключающаяся в том, что высокомагнезиальные вулканиды с повышенным содержанием общего никеля сопровождаются интрузивами, вмещающими месторождения и рудопоявления сульфидного никеля и меди.

## Глава 6. МЕТАЛЛОГЕНИЯ И МИНЕРАГЕНИЯ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РАННЕГО ДОКЕМЕРИЯ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

В таблице показана связь различных металлических и неметаллических ископаемых с определенными магматическими формациями (комплексами) и петрохимическими сериями высокомагнезиальных магматитов. В диссертации дается краткое описание наиболее характерных месторождений и рудопоявлений в соответствии с проведенным металлогеническим районированием, позволившим выделить более 20 металлогенических зон и узлов для лопийской и карельской металлогенических эпох.

С ультрамафитами толеитовой серии лопийской металлогенической эпохи связаны небольшие месторождения богатых медно-никелевых руд в Терско-Аллареченском зеленокаменном поясе (Аллареченское, Восток), а также мелкие месторождения и рудопоявления в вулканитах и плутонитах коматиитовой серии в ряде зеленокаменных поясов (Суомуссалми-Кухмо, Сумозерско-

Кенозерском, Ведлозерско-Сегозерском). Хромитовые оруденения известны в Южно-Выгозерском и Сумозерско-Кенозерском поясах.

Рудопоявления асбеста и талька установлены работами ПГО "Севзапгеология" в Светлоозерском и Лебяжинском массивах Каменноозерской структуры, тальк-хлоритовые сланцы — в районе Сегозера. В некоторых поясах с высокомагнезиальными вулканидами ассоциируются колчеданы и золото.

Карельская металлогеническая эпоха разделяется на три этапа: гирвасский, кондопожский и свекофенский. С высокомагнезиальными магматитами гирвасского этапа (перидотит-габбро-норитовая формация) связаны промышленные месторождения и рудопоявления хромитов (Кеми, Койтелайнен, Бураковский и др.) Расслоенные массивы зоны Торнио-Кукаосзеро содержат рудопоявления ЭП и золота, а в габброидах массива Муставаара выявлены рудопоявления и месторождения железо-титановых руд. Массивные породы расслоенных интрузий представляют собой также прекрасный облицовочный материал с высокодекоративными свойствами и используются в различных областях строительной индустрии.

Кондопожский этап характеризуется промышленными медно-никелевыми месторождениями и рудопоявлениями (Медно-никелевые..., 1985), связанными с ультрамафитами толеитовой серии (Печенгский и соленоозерский комплексы), а также прогнозируется на глубинах 300-500 м в Онежской структуре Онегосерско-Рыбинского проторифта. Высокомагнезиальные вулканиды Онежской структуры находят промышленное применение в петругической промышленности. В проторифте Кайнуу-Оутокумпу, расположенном в основном на территории Финляндии, рудопоявления и месторождения цветных металлов (Керетти, Луйконлахти, Буонас, Полвиярви и др.) приурочены к его центральной части. Наибольший промышленный интерес представляют медные руды, концентрирующиеся на контакте серпентинитов и кварцитов. Эксплуатируются также комплексные руды, содержащие Zn, Co, Ni (Медно-никелевые..., 1985). В проторифтах Лапландском и Ветреный Пояс высокомагнезиальные вулканиды коматиитовой серии представляют интерес в отношении силикатного никеля и других металлов, концентрирующихся в палеозойских корах выветривания на этих телах (Земная кора..., 1983).

В свекофенский этап формировались месторождения медно-никелевых руд, связанные с интрузивными ультрамафитами и мафитами — в зонах Коталахти, Шеллефте, Кюльмякоски и других, расположенных в пределах СП. В КЛКП с этим этапом следует связывать комплекс полезных ископаемых (титаномагнетит, редкие земли, кальцит, апатит), концентрирующихся в массивах Тикше-озера, Елетьозера, Гремяха-Вурмес, высокомагнезиальные породы которых принадлежат щелочно-ультрамафитовой серии.

Анализ рудной продуктивности высокомагнезиального магматизма раннего докембрия Балтийского щита показывает, что она нарастает от лопия к сумию, достигая максимума в людикувии, а затем снижается в калевии и вепсии. При этом от архея к протерозою возрастает спектр промышленно значимых металлов (архей — медь, никель; протерозой — медь, никель, хром, полиметаллы, ЭП, титан, редкие земли, золото и др.).

Выявленная связь определенного комплекса полезных ископаемых с соответствующими сериями высокомагнезиальных магматитов позволяет рассматривать сериальную принадлежность в качестве важного петрологического признака рудоносности магматитов.

На основе геологических, геофизических, петрологических, геохимических критериев рекомендуются в пределах Карелии конкретные участки и структуры для поисков месторождений, связанных с высокомагнезиальными магматитами, в т.ч. Бураковско-Монастырская зона на хромиты, ЭП, силикатный никель; Онего-зерско-Рыбинская на никель, ЭП, полиметаллы.

## Глава 7. ПЕТРОГЕНЕЗИС НЕКОТОРЫХ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ СЕРИЙ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

Вопросы петрогенезиса высокомагнезиальных пород рассматриваются в работе главным образом на материалах по КВ части Балтийского щита с использованием результатов полевых наблюдений, петрографических, минералогических и петрогеохимических исследований, а также экспериментальных данных, полученных на вулканитах региона.

Первые эксперименты по плавлению пород коматитовой серии были проведены в 1969 году (Куликов, Калинин, 1971).

В атмосферных условиях воспроизводились различные структуры (в том числе спинифекс) ВКБ свиты Ветреный Пояс. Последующие экспериментальные работы Д.Грина, Н.Ардта, М.Бикля, Е.Такахаши, И.Куширо, а также А.В.Гирниса с коллегами (1987) при высоких давлениях позволили оценить условия генезиса высокомагнезиальных пород, в том числе и в рассматриваемом регионе. В диссертации приводятся Р-Т-диаграммы для коматита, ВКБ и НКБ по литературным данным с некоторыми уточнениями автора в области низких давлений. В целом результаты экспериментов удовлетворительно объясняют наблюдаемые особенности минерального состава, текстур и структур вулканитов и плутонитов проторифта Ветреный Пояс.

С учетом экспериментальных данных в работе рассмотрены механизмы формирования дифференцированных лавовых покровов высокомагнезиальных вулканитов Ветреного Пояса. В ряде покровов выделены четыре зоны (снизу вверх): кумулятивная, надкумулятивная, полосчатая (спинифексная) и кровельная, которые различаются как по вещественному составу и структуре составляющих их пород, так и очередности формирования. Предложена модель образования дифференцированных покровов, в которой выделяется две стадии: потоковая (в период течения лавы) и "озерная" (период остывания расплава в условиях лавового озера). Кровельная зона формируется в основном в первую стадию, а остальные — во вторую в процессе гравитационной дифференциации в условиях ограниченной конвекции и общего остывания расплава.

Показано, что вещественный состав последовательно залегающих лавовых покровов и потоков на хорошо изученных участках в проторифте Ветреный Пояс (Мяндуха, Голец) и Онежской структуре (оз. Гомсельга) отражает неоднородность формирующегося их магматического расплава. Рассчитанные магматические расплавы изменяются по содержанию  $MgO$  от 11 до 16.2% (Мяндуха) и от 8 до 18% (оз. Гомсельга). Такие колебания магнезии и соответственно других компонентов связываются с гравитационной дифференциацией (фракционирование оливина, частично пироксена) в разноглубинных камерах и периодическим поступлением дифференцированного расплава на поверхность. Для района Ветреного Пояса с учетом условий кристаллизации ортопироксена из расплава ВКБ (по данным эксперимента) и мощности лавовой толщи она оценивается в 5–8 км. Более глубинными являлись очаги, формировавшие расслоенные массивы типа Бураковского.



Сделана попытка оценить некоторые параметры генерации коматитовых расплавов для Сумозерско-Кенозерского, Ведлозерско-Сегозерского, Суомуссалми-Кухмо и других зеленокаменных поясов архея с использованием средних составов спинифексных коматитов, которые с небольшими поправками принимались за исходные расплавы. Показано, что на основании экспериментальных данных и РТ-диаграмм И.Д.Рябчикова и О.А.Богатикова (1984, 1987) отделение этих расплавов от рестита происходило при степени плавления примитивной мантии от 35 до 50%, давлении 36-47 кбар и температуре 1750-1780°.

Исходя из современных геодинамических обстановок проявления высокомагнезиального магматизма (в рифтах и "горячих точках"), обусловленного восходящими мантийными струями, предполагается, что зоны развития высокомагнезиальных пород в раннем докембрии являются следами воздействия на литосферу восходящих струй конвектирующей докембрийской астеносферы. При этом план размещения высокомагнезиальных магматитов и ассоциирующихся с ними образований на Балтийском щите на различных временных срезах может быть описан тремя следующими типами: полигональным, ортогональным и линейным. Для долия характерен в основном полигональный тип, где мафит-ультрамафиты как бы цементируют микроплиты (блоки) саамских образований (Водлозерская, Западно-Карельская и др.) с поперечником порядка 200-300 км. В позднем архее полигональный тип размещения мафит-ультрамафитов намечается также в Среднеприднепровской и Курской гранит-зеленокаменных областях Восточно-Европейской платформы. Для раннего карелия отчетливо просматривается ортогональный тип размещения высокомагнезиальных магматитов по системе двух взаимно перпендикулярных (СВ и СЗ) направлений. В среднем карелии (людиковии) доминирует линейный тип развития магматитов, связанных с рифтогенными структурами СЗ простирания. Среднее расстояние между осями этих прото-рифтов составляет 200-250 км (рис. ).

В пределах КЛКП устанавливается закономерное упрощение планов от полигонального типа в позднем архее через ортогональный в раннем карелии до линейного в среднем карелии. Данная закономерность может быть объяснена с позиций прогрессивно остывающего Балтийского сегмента Земли, в пределах которой

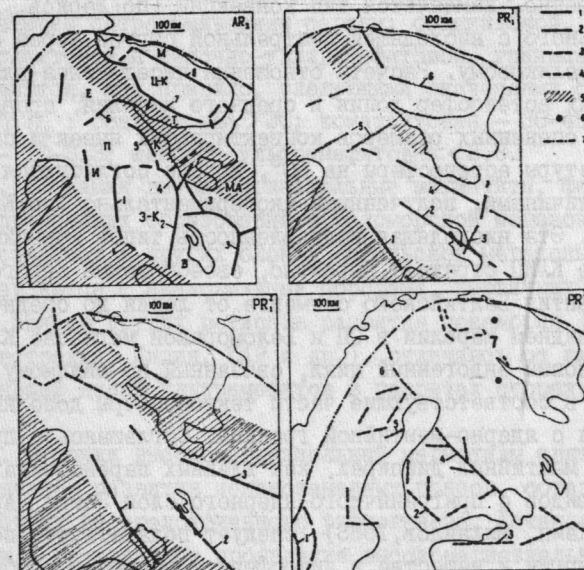


Схема основных зон развития высокомагнезиальных магматитов раннего докембрия Балтийского щита

AR<sub>1</sub>: 1 - осевые зоны высокомагнезиального магматизма и долийских зеленокаменных поясов (1 - Суомуссалми-Кухмо, 2 - Ведлозерско-Сегозерский, 3 - Сумозерско-Кенозерский, 4 - Тикозерско-Пелозерский, 5 - Нотозерский, 6 - Тунтса-Савукоски, 7 - Терско-Аллареченский, 8 - Колмозеро-Воронья); реликты микроплит: М - Мурманская, Ц-К - Центрально-Кольская, Е - Енская, Т - Терская, П - Пяозерская, К - Кемская, МА - Маленгская, И - Иисалими, З-К - Западно-Карельская, В - Водлозерская.

PR<sub>1</sub>: 2 - осевые зоны высокомагнезиального магматизма и протавлакогенного раннего карелия (1 - Кайнуу-Оутокумпу, 2 - Центрально-Карельский, 3 - Бураковско-Монастырский, 4 - Восточно-Карельский, 5 - Кеми-Кукасозеро, 6 - Печенга-Варзуга).

PR<sub>2</sub>: 3 - осевые зоны высокомагнезиального магматизма и проторифтов людиковии (1 - Кайнуу-Оутокумпу, 2 - Онегозерско-Рибинский, 3 - Ветреный Пояс, 4 - Лапландский, 5 - Печенга-Варзуга).

PR<sub>3</sub>: 4 - осевые зоны мафит-ультрамафитового магматизма позднего карелия (по: Медно-никелевые..., 1985 с дополнениями автора) (1 - Дальсландские, 2 - Кульмякоски, 3 - Северо-Эстонская, 4 - Коталахти, 5 - Шеллефте, 6 - Северо-Шведская, 7 - Лапландско-Беломорский шов), 5 - области интенсивной переработки архейской коры в свекофенское время, 6 - массивы щелочно-ультрамафитовой серии (Гремяха-Вырмес, Елетьозеро-Тикозеро), 7 - граница щита с тиманидами и каледонидами.

температура мантии падает, уменьшается мощность астеносферы и, соответственно, изменяется тип конвекции (по: Марков, 1983) от полигонального с нисходящей центральной струей через бимодальный к валиковому. Расчеты отношения чисел Рэлея для конвектирующих астеносфер лопия и среднего карелия, проведенные с учетом оцененных размеров конвектирующих ячеек и снижения температуры астеносферы на  $50^{\circ}$ , хорошо согласуются с подобными величинами, полученными экспериментально (по: Кравченко, 1988). Эта нисходящая направленность типов конвекции в астеносфере КЛКП отражает, вероятно, своеобразный эндогенный цикл развития Балтийского сегмента от лопия до среднего карелия. В позднем карелии в СП и Беломорской мегазоне КЛКП фиксируется новый эндогенный цикл, связанный, по-видимому, с поступлением в соответствующие части тектоносферы дополнительной энергии с ядерно-мантийной границы. Соглашаясь с представлением о мантийных диапирах, как главных переносчиков энергии и флюидов с приграничного ядерного слоя Земли (Артишков, 1979; Хаин, Михайлов, 1988) следует полагать, что передача этой энергии и вещества в литосферу в раннем докембрии осуществлялась через конвектирующий астеносферный слой. Тип конвекции в нем в основном определял форму и размеры обособившихся микролит или их зародышей. Интенсивность магматизма на границах формирующихся микролит, его формационный состав во многом зависели также от динамики самих микролит, их взаимодействия и взаимовлияния.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение комплексов высокомагнезиальных магматитов в типовых структурах докембрия Карелии и сопоставление их с подобными образованиями Кольского полуострова, Финляндии, Швеции, Норвегии и других докембрийских регионов позволяют сделать следующие выводы:

1. Высокомагнезиальный магматизм играл существенную роль в становлении и развитии докембрийской земной коры на Балтийском щите, проявляясь в раннеархейскую (саамскую), позднеархейскую (лопийскую), раннепротерозойскую (карельскую) и Позднепротерозойскую (рифейскую) тектонические эпохи и отражая цикличность геологических процессов на фоне необратимого раз-

вития тектоносферы.

2. Высокомагнезиальные магматиты докембрия щита относятся к четырем петрохимическим сериям: бонинитовой, коматиитовой, толейтовой и щелочно-ультрамафитовой, границы которых определяются, как правило, следующими значениями отношения  $Al_2O_3/TiO_2$ : бонинитовая  $> 30$ ; коматиитовая —  $30-40$ ; толейтовая —  $10-3,3$ ; щелочно-ультрамафитовая  $< 3,3$ .

3. В саамии высокомагнезиальные магматиты, фиксируемые среди древнейших образований в Беломорской мегазоне, а также в Водлозерском и других блоках Карельской мегазоны, в целом сопоставляются с аналогичными породами "первичных" зеленокаменных поясов других регионов развития докембрия (Гренландия, США, Австралия, Индия, КАР и др.), отличаясь от южных материков меньшей долей ультрамафитов в разрезах супракрустальных толщ.

4. В лопии высокомагнезиальный магматизм связан с рифтоидным этапом развития зеленокаменных поясов, образующих единую систему рассредоточенного рифтогенеза. Устанавливается двух- или трехкратное проявление высокомагнезиального (существенно коматиитового) вулканизма, а общая доля его продуктов в разрезах поясов составляет от 3 до 12%.

5. В карелии высокомагнезиальный магматизм связан с различными этапами развития эпилопийской Фенно-Сарматской прото-платформы. На раннекарельском этапе он проявляется в протовалякогенах в эффузивной (коматиитовая серия) и интрузивной фациях, в том числе в виде расслоенных интрузий (коматиитовая и бонинитовая серии.). Максимальное развитие происходит в проторифтах среднекарельского этапа (лидиковий), где доля высокомагнезиальных вулканитов в разрезах супракрустальных толщ достигает порой 40% (Ветреный Пояс).

В позднекарельский этап наблюдается спад интенсивности высокомагнезиального магматизма. В СП формируются пояса преимущественно интрузивных магматитов коматиитовой (?) серии, а в КЛКП многофазные интрузивы с высокомагнезиальными магматитами щелочно-ультрамафитовой серии.

6. В целом для высокомагнезиального магматизма Балтийского щита, очевидно, в условиях прогрессивного наращивания мощности его литосферы и сокращения астеносферы происходит смена петрохимических серий от коматиитовой (резко преобла-



дающей в архее) к толеитовой (играющей важную роль в среднем карелии) и щелочно-ультрамафитовой (проявляющейся в позднем карелии и рифее). При этом существенно меняется план размещения магматитов от полигонального (лопий) к ортогональному (сумий) и линейному (людиковий), что объясняется, вероятно, сменой типов конвекций и размеров конвективных ячеек в астеносфере.

7. Коматиитовые расплавы, возникающие при высокой степени плавления гетерогенной мантии, испытывают дифференциацию в разноглубинных промежуточных камерах, а также в процессе остывания лавовых тел, где ведущим ее фактором являются кристаллизация оливина, в меньшей степени — пироксена.

8. Высокомagneзиальные магматиты, наряду с традиционными комплексами полезных ископаемых в известных промышленных или потенциально промышленных районах Балтийского щита, представляются перспективными на следующие виды минерального сырья: 1) медно-никелевые руды, связанные с магматитами коматиитовой серии в Сумозерско-Кенозерском зеленокаменном поясе и интрузивными ультрамафитами толеитовой серии в архейских структурах Беломорской и Кольской мегазон, а также в протерозойском Онегозерско-Рыбинском проторифте; 2) платиноиды и хромиты в расслоенных интрузивах, в том числе в массивах Бураковско-Монастырской зоны; 3) силикатный никель и другие элементы в корах выветривания на высокомагнезиальных породах юго-восточного склона Балтийского щита, а также никель и магний в сапролитах Бураковского массива; 4) неметаллические полезные ископаемые (талк, хлорит, асбест, огнеупорное сырье и др.) в комплексе с рудным сырьем; Ультрамафиты заслуживают дальнейшего изучения и как источники алмазов, золота и ЭПГ.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Новые данные по геологии и магматизму синклинойной зоны Ветреного Пояса // Тр. Ин-та геологии Кар. ФАН СССР, 1968, №1 (соавт. А.И. Богачев, В.Д. Слюсарев, А.В. Пекуров).
2. Базальтовый комплекс Ветреного Пояса и некоторые причины разнообразия среднепротерозойского вулканизма юго-

восточной части Балтийского щита // Проблемы магматизма Балтийского щита. Л.: Наука, 1971.

3. Экспериментальное воспроизведение некоторых структур базальтов Ветреного Пояса // Минералогия и геохимия докембрия Карелии. Л.: Наука, 1971 (соавт. Ю.К. Калинин).

4. Геохимическая эволюция базит-ультрабазитового магматизма протерозоя (юго-восток Балтийского щита): Мон. Л.: Наука, 1973 (соавт. В.Д. Слюсарев).

5. Геохимическая эволюция базит-ультрабазитового магматизма протерозоя // ДАН СССР, 1973, т. 212, №3 (соавт. В.Д. Слюсарев).

6. Специфика базит-ультрабазитового магмопроявления в Северной Карелии // Изв. АН СССР, сер. геол., 1974, № 12 (соавт. В.Д. Слюсарев, В.И. Кочнев-Первухов).

7. Главные черты геологического строения и формационный анализ магматических образований докембрия восточной части Балтийского щита // Геология, петрология и металлогения кристаллических образований Восточно-Европейской платформы. М.: Недра, 1976 (соавт. И.В. Бельков, А.И. Богачев и др.).

8. Главные петрохимические черты протерозойского вулканизма Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 1976.

9. Высокомagneзиальный магматизм докембрия юго-восточной части Балтийского щита // Вулканизм докембрия. Петрозаводск, 1976 (соавт. В.Д. Слюсарев, М.Г. Попов).

10. Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы докембрия Карелии: Мон. Л.: Наука, 1976 (соавт. А.И. Богачев, В.Д. Слюсарев, А.П. Светов и др.).

11. Взаимосвязь металлогении и глубинного строения Карело-Кольского региона // Геология рудных месторождений, 1977, № 6 (соавт. С.И. Зак, А.И. Богачев, Р.А. Хазов и др.).

12. Вулканические постройки протерозоя Карелии: Мон. Л.: Наука, 1978 (соавт. В.А. Соколов, В.И. Робонен и др.).

13. К выделению Сумозерско-Кенозерского зеленокаменного пояса архея на восточной окраине Балтийского щита // Геология раннего докембрия Карелии. Петрозаводск, 1979 (соавт. В.В. Куликова).

14. Эволюция магматизма и геологические рубежи раннего

докембрия Балтийского щита // Стратиграфия архея и нижнего протерозоя. Л., 1979 (соавт. А.И. Богачев, Л.П. Свириденко).

15. Геохимическая карта восточной части Балтийского щита. М-б 1:1 500 000 // Металлогения восточной части Балтийского щита. Л.: Недра, 1980 (соавт. А.А. Смыслов, Э.А. Ланда и др.).

16. Суйсарский вулканический комплекс // Магматические формации раннего докембрия территории СССР. М.: Недра, 1980 (соавт. В.И. Кочнев-Первухов, В.Д. Слюсарев и др.).

17. Jatulian geology of the Raanaajarvi-Kuolaajarvi synclinorium // Jatulian geology of the eastern part of the Baltic shield. Rovaniemi, 1980 (соавт. L.P. Galdobina et al.).

18. Новые данные об архейских перидотитовых коматититах в Восточной Карелии // ДАН СССР, 1981, Т. 259, № 3 (соавт. В.В. Куликова).

19. Вулканизм архейских зеленокаменных поясов Карелии: Мон. Л.: Наука, 1981 (соавт. С.И. Рыбаков, В.В. Куликова и др.).

20. Никеленосность юго-восточной части Балтийского щита // Проблемы петрологии в связи с генезисом сульфидного медно-никелевого рудообразования. М.: Наука, 1981 (соавт. А.И. Кайряк, А.И. Богачев, В.Д. Слюсарев и др.).

21. Связь магматизма Карелии с глубинным строением и проблемы рудоносности // Геология, петрология, корреляция кристаллических комплексов европейской части СССР. Л.: Недра, 1982 (соавт. А.И. Богачев, Л.П. Свириденко и др.).

22. Ультрасосновые эффузивы в докембрии КВ части Балтийского щита // Мантийные ксенолиты и проблемы ультрососновых магм. Новосибирск, 1983 (соавт. В.В. Куликова).

23. Рифтовый вулканизм раннего протерозоя Балтийского щита // Палеовулканологические реконструкции и тектоника. Владивосток, 1982 (соавт. В.В. Куликова).

24. Земная кора и металлогения юго-восточной части Балтийского щита: Мон. Л.: Наука, 1983 (соавт. А.И. Богачев, В.Д. Слюсарев и др.).

25. Геология и металлогения архейских зеленокаменных поясов фундамента Восточно-Европейской платформы // Тез. докл. 27 МК. М.: Наука, 1984 (соавт. С.И. Рыбаков, А.Н. Берковский, В.П. Чекулаев, Е.М. Крестин, Б.И. Малюк, А.А. Сиворонов).

26. Раннепротерозойские коматититы // Там же (соавт. В.В. Куликова).

27. Эволюция докембрийских коматититовых магм на примере восточной части Балтийского щита // ДАН СССР, 1985, Т. 284, № 4 (соавт. И.Д. Рябчиков, О.А. Богатиков, А.В. Гирнис, В.В. Куликова).

28. Природа и динамика развития архейских зеленокаменных поясов Балтийского щита // Докембрийские троговые структуры Байкало-Амурского региона и их металлогения. Новосибирск: Наука, 1985 (соавт. С.И. Рыбаков).

29. Некоторые результаты изотопного датирования КВ окраины Балтийского щита // Изотопные методы и проблемы геологии докембрия Карелии. Петрозаводск, 1985 (соавт. М.М. Аракелянц, В.В. Куликова, А.К. Симон).

30. Некоторые черты эндогенных режимов в докембрии Карельского региона // Эндогенные режимы формирования земной коры и рудообразования в раннем докембрии. Л., 1985 (соавт. В.В. Куликова).

31. Геология Карелии: Мон. Л.: Наука, 1987 (соавт. В.А. Соколов, М.М. Стенарь и др.).

32. Металлогения архейских зеленокаменных поясов фундамента Восточно-Европейской платформы // Металлогения докембрия. Л.: Наука, 1987 (соавт. С.И. Рыбаков, А.Н. Берковский и др.).

33. Коматититы и высокомагнезиальные вулканы раннего докембрия Балтийского щита: Мон. Л.: Наука, 1988 (соавт. А.В. Гирнис, И.Д. Рябчиков, В.А. Горьковец, В.В. Куликова, М.Б. Раевская, А.И. Светова, С.А. Вахирев).

34. Эволюция магматизма Водлозерского блока Карельской гранитно-зеленокаменной области в архее // Магматизм, метаморфизм и геохронология докембрия Восточно-Европейской платформы в связи с картированием. Петрозаводск, 1987 (соавт. А.К. Симон, В.В. Куликова и др.).

35. Магматизм докембрия Карелии // Там же (соавт. А.И. Богачев, В.А. Соколов, А.П. Светов, Л.П. Свириденко и др.).

36. О расчленении высокомагнезиальных вулканитов докембрия Карелии по данным петрохимии и хромшпинелидам // Минералогия докембрия Карелии. Петрозаводск, 1988.

37. Вулканогенные и осадочно-вулканогенные формации зеленокаменных поясов фундамента Восточно-Европейской платформы // Зеленокаменные пояса фундамента Восточно-Европейской платформы. Л.: Наука, 1988 (соавт. В.Д. Колий, А.А. Сиворонов, А.Б. Бобров и др.).



38. Петрохимия коматитов // Там же (соавт. Б.И.Малюк, С.Б.Лобач-Жученко, Н.А.Арестова, Е.М.Крестин).

39. Высокомagneзиальные вулканы лопийских зеленокаменных поясов и карельских рифтогенных структур (сравнительный анализ) // Геология и метаморфизм архейских зеленокаменных поясов. Петрозаводск, 1988 (соавт. В.Я.Горьковец, В.В.Куликова, М.Б.Раевская, А.И.Светова, В.Н.Харин).

40. Металлогеническая карта Карело-Кольского региона. М-б 1:1 000 000./Отв. ред. В.Е.Попов, Д.В.Рундквист. Л., 1988 (соавт. В.И.Робонен, А.В.Синицын, В.А.Коровкин и др.).

41. Trace-element geochemistry of Archaean and Proterozoic rocks from eastern Karelia, USSR. // Lithos. Amsterdam. 1988, 21 (соавт. И.Д.Рябчиков и др.).

42. Рифтогенные системы раннего докембрия Балтийского щита и их эволюция // Магматизм рифтов. М.:Наука, 1989 (соавт. В.В.Куликова).

43. Коматитовые серии раннего докембрия СССР // Формационный анализ магматитов. Свердловск, 1989.

44. Высокомagneзиальный магматизм и некоторые вопросы геодинамики раннего докембрия Балтийского щита // Высокомagneзиальный магматизм раннего докембрия. Петрозаводск, 1989.

45. Находка коматитов саамского (нижнеархейского) возраста на Балтийском щите // ДАН СССР, 1989, т.308, № 6 (соавт. В.В.Куликова, Я.В.Бычкова).

46. Early Precambrian high-magnesian magmatism in the Baltic Shield // US - USSR-Canada Seminar: Precambrian geology S. Canadian Shield and E.Baltic Shield. Duluth Minnesota. 1990.

47. Эволюция докембрийской мантии и интерпретация результатов  $Sm-Nd$  изотопного анализа коматитов Восточной Карелии.

(соавт. А.В.Гирнис, И.Д.Рябчиков, П.Саддоби, В.В.Куликова.) // Геохимия, 1990, № 10.

COB) PA

|  |                                                                                        |           |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|  | И                                                                                      |           |
|  | <div>Кол<br/>булган</div>                                                              |           |
|  | Пирит<br>льтова<br>не ченгс                                                            |           |
|  | ПИРИТ<br>льтова<br>гуярви                                                              | [1995-20] |
|  | ТОЛЕМИТ<br>товаян<br>сийск<br>мозево<br>умойнс<br>мустьа<br>кий тр<br>зальго<br>плекан |           |
|  | КОМАТИН<br>залъис<br>лисроо                                                            |           |
|  | КОМАТИН<br>запроо<br>вал оое<br>ченски<br>Толеми<br>Льтова<br>(Мукиш)                  |           |
|  | Комати<br>залъи<br>ласот<br>кий)                                                       |           |

ИЗТОП  
НЕСОПД



$\mu_i(m)$ ,  $V(P)$ ,  $\mu_i(?)$ ,  $M_i(m)$ ,  $i(m)$ ,  $N_i(m)$

| Тектонический режим                     | Петрохимические серии высокомагматических магматитов | Металлогенческая специализация высокомагматических и ассоциирующихся с ними пород                                |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Мегакристаллов                          | Толeutовая, щелочно-ультрамафитовая                  | Cu, Ni (p)<br>Fe, Ti (m)<br>P, P3, кальцит (p).                                                                  |
| Протоплатформенный протогеоинклинальный | Коматитовая ?                                        | Cu, Ni (m, p)                                                                                                    |
| Протоплатформенный                      | Толeutовая                                           | Cu, Ni (m)<br>асбест (p)<br>каменнелитейное сырье (m)                                                            |
|                                         | Коматитовая                                          | Au (?)                                                                                                           |
|                                         | Толeutовая                                           |                                                                                                                  |
|                                         | Толeutовая                                           |                                                                                                                  |
|                                         | Коматитовая                                          | Fe, Ti, V (p)<br>Cr, Ni, Cu, V (m)<br>эпидимит (p)<br>облицовочный камень (m, p)<br>каменнелитейное сырье (m, p) |
| Нуклеарный (микроплитный)               | Толeutовая                                           | Cu, Ni (m)                                                                                                       |
|                                         | Коматитовая                                          | Cu, Ni, асбест, тальк (p)                                                                                        |
|                                         | Толeutовая                                           |                                                                                                                  |

иными источниками; m — месторождения, p — рудопроизведения  
 иванна, — преимущественно основное залегание, — не установлен.