

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

*На правах рукописи*

УДК 550.42+553.493.42/43:552.33 (470.22)

**Рыбаков Дмитрий Сергеевич**

**Геохимия бария, стронция и сопутствующих элементов в щелочно-ультрамафитовых породах калиевого ряда (на примере Элисенваарского интрузивного комплекса, Западное Приладожье)**

**Специальность 04.00.02**

**геохимия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Санкт-Петербург  
1995**

Работа выполнена на кафедре геохимии геологического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

**Научный руководитель:** доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геохимии СПбГУ, профессор Гордиенко Владимир Васильевич

**Официальные оппоненты:** доктор геолого-минералогических наук, профессор Соколов Юрий Михайлович, ИГГД РАН

кандидат геолого-минералогических наук  
Иванников Валерий Васильевич,  
кафедра петрографии СПбГУ

**Ведущая организация:** Санкт-Петербургский Горный Институт

Защита состоится 26 декабря 1995 г. в 15 часов в аудитории N 52 на заседании Диссертационного совета К 063.57.44 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук в Санкт-Петербургском государственном университете

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
им. А.М.Горького при СПбГУ

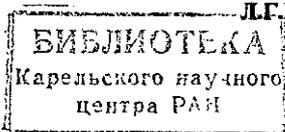
Автореферат разослан 14 ноября 1995 г.

159875 К

Отзывы на диссертацию в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., д.7/9, Государственный университет, геологический факультет.  
Диссертационный совет

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

Л.Г.Виноградова



## Введение

**Актуальность темы исследования:** Настоящая работа посвящена изучению пород Элисенваарского комплекса - интереснейших в минералогическом и геохимическом отношении образований на Балтийском щите. Об их происхождении до настоящего времени единого мнения не существует. Выдвигаются различные, подчас, противоречивые точки зрения (Ивашенко и др., 1989; Хазов и др., 1993, Иванников и др., 1987), базирующиеся главным образом на разрозненных данных по геологии, петрологии, минералогии и петрохимии данного комплекса.

Для его изучения автором избран минералого-геохимический подход, поскольку он, в сочетании с другими различными методами, в том числе геологическими и петрологическими, позволяет найти адекватные объяснения природным явлениям, связанным с магматическими или метасоматическими процессами. Несмотря на многочисленные работы, посвященные геологии, петрологии и минералогии Элисенваарского комплекса, применительно к нему подобный подход до настоящего времени реализован не был.

Главное место в настоящей диссертации отводится исследованию геохимии щелочноземельных элементов - Ba и Sr. Их высокие содержания (первые проценты) являются характерной геохимической чертой исследуемых пород.

**Цель и задачи исследования.** Цель настоящей работы заключается в том, чтобы на основании изучения особенностей распределения Ba, Sr и ряда сопутствующих элементов (Rb, Li, F и др.) в породах и минералах Элисенваарского комплекса установить геохимические и минералогические критерии принадлежности указанных пород к определенному генетическому типу, выявить основные черты поведения Ba и Sr в процессе его формирования, установить причины их аномально повышенных (до 2 и более масс. %) содержаний в ладогалитах, определить главные закономерности их геохимических связей с петрогенными и малыми примесными элементами.

Для достижения этой цели необходимо было выполнить следующее:

1. Дать характеристику геологического строения Элисенваарского комплекса.
2. Изучить минералогию и петрохимию пород комплекса, закономерности распределения Ba, Sr и сопутствующих элементов в указанных породах, а также в основных минералах-концентракторах этих элементов - полевых шпатах и слюдах.
3. Увязать вариации содержаний Ba и Sr в калиевом полевом шпате с другими его типоморфными характеристиками - показателями преломления, структурной упорядоченностью, параметрами элементарной ячейки и т.д.

4. На основании известных из литературы коэффициентов распределения Ba и Sr между кристаллизующимися минеральными фазами и расплавом при помощи компьютерных расчетов разработать петролого-геохимическую модель формирования комплекса ладогалитов-генсбергитов.

**Фактический материал и методы исследования.** Материал для исследования собран автором совместно с сотрудниками лаборатории рудных месторождений Института геологии Карельского научного центра РАН под руководством Р.А.Хазова в ходе полевых работ в Западном Приладожье в период с 1986 года по настоящее время. Изучение геологического строения Элисенваарского массива и отбор проб проводился в естественных обнажениях и, частично (около 10 % проанализированных проб), при документации керна. За время лабораторных исследований выполнено около 500 полных силикатных анализов пород и минералов, исследовано до 1000 шлифов щелочных пород и вмещающих их образований, самостоятельно получено более 20 дифрактограмм полевых шпатов, более 30 количественных спектральных определений Ba и Sr в различных минералах (полевой шпат, биотит, апатит и др.) из пород комплекса, проведен микронзондовый анализ указанных минералов, определены показатели преломления для полевых шпатов из пород Элисенваарского и Оярвинского массивов. Химические и спектральные анализы выполнены в лабораториях химического (аналитики: В.А.Кукина, А.И.Сельшьева, Н.В.Питкя, В.Л.Утицына, М.Б.Петкевич, Р.Ф.Сарафанова и др.) и спектрального (аналитики: Г.С.Терновая, Г.Д.Епишина) анализа Института геологии КНЦ РАН. При помощи ЭВМ построены гистограммы, выбраны законы распределения компонентов, рассчитаны их средние содержания и дисперсии, выполнены корреляционный и факторный анализы, построены бинарные диаграммы, получены модели поведения Ba и Sr в ходе магматической фракционной кристаллизации.

**Научная новизна.** Впервые на основании геохимических методов исследования в сочетании с методами математической статистики и компьютерного моделирования рассмотрены петрологические аспекты формирования рифейского комплекса (Хазов и др., 1993) щелочно-ультрамафитовых пород калиевого ряда. Полученные результаты исследования указывают на ведущую роль в этом процессе магматической кристаллизационной дифференциации. При этом также впервые:

- выявлены закономерности поведения типоморфных для данного комплекса щелочноземельных элементов - Ba и Sr, а также сопутствующих элементов (Rb, Li, F и др.) в процессе кристаллизационной дифференциации магмы, рассчитан баланс распределения Ba и Sr между минералами для главных типов пород системы;

- выявлено последовательное, в ходе направленной магматической кристаллизации, уменьшение содержаний Ba и Sr и увеличение содержаний Rb в калиевых породообразующих минералах (полевых шпатах, флогопитах и биотитах) от ранних фаз к более поздним и тесная корреляционная зависимость между этими показателями;

- установлено, что наиболее чутким индикатором, реагирующим на изменение состава минералообразующей среды является (наряду со слюдами) "ортоклазовая" фаза микропертитовых Ba-Sr-содержащих K-Na полевых шпатов, в которой содержания Ba и Sr связаны тесной корреляционной зависимостью с другими ее типоморфными характеристиками (структурной упорядоченностью, параметрами элементарной ячейки, показателями светопреломления);

- с использованием коэффициентов распределения Ba и Sr между магматическим расплавом и различными твердыми фазами построены петролого-геохимические модели фракционирования указанных элементов в ходе кристаллизации. Кроме того, по петрогенным окислам рассчитана модель частичного плавления вещества "гипотетической мантии Приладожья" (Хазов, 1993), дающая при 10-15%-м плавлении составы родоначальной "ладогалитовой" магмы, близко совпадающие с составами наиболее меланократовых пород Элисенваарского комплекса.

**Практическая ценность работы.** Практическая ценность работы определяется возможным использованием в народном хозяйстве пород Элисенваарского массива в качестве комплексного минерального сырья - Ba-Sr-полевошпатового, фосфорного, титанового и редкоземельного (Хазов и др., 1990; 1993). Для реализации этой задачи особое значение имеют полученные в настоящей диссертации данные о количественном распределении Ba и Sr между отдельными минералами в породах Элисенваарского комплекса, а также установленные геохимические и минералогические критерии для поисков и прогнозной оценки рудоносности объектов рассматриваемого генетического типа.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях молодых ученых и специалистов: по геологии докембрия, посвященной 75-летию члена-корреспондента АН СССР К.О.Кратца (Петрозаводск, 1990 г.), "Геология Балтийского щита", посвященной памяти К.О.Кратца (Апатиты, 1993 г.), заседаниях кафедры геохимии Санкт-Петербургского государственного университета (ежегодные отчеты о состоянии диссертационной работы), Всероссийском семинаре "Геохимия магматических пород" (ГЕОХИ РАН, Москва, 1993 г.),

расширенных заседаниях лаборатории геодинамики и металлогении Института геологии КНЦ РАН (Петрозаводск, 1995 г.).

#### Основные защищаемые положения.

1. Элисенваарский интрузивный комплекс ладогалитов-тенсбергитов Западного Приладожья принадлежит магматическим щелочно-ультрамафитовым породам калиевого ряда, характеризующимся аномально высокими содержаниями Ва и Sr при пониженном содержании Rb.

2. Ведущая роль в распределении главных петрогенных элементов в ряду последовательных фаз внедрения Элисенваарского комплекса принадлежит процессам фракционной кристаллизации. Перераспределение компонентов в связи с аутометасоматическими и поздними гидротермальными процессами в породах комплекса проявлено незначительно.

3. Основным минералом-носителем Sr в ладогалитах является микропертитовый Ва-Sr-содержащий K-Na полевой шпат (МПШ), а Ва - МПШ и слоды (данные минерального баланса). Распределение и содержания Ва, Sr и Rb в породах Элисенваарского комплекса определяются составом присутствующих минералов и их количественным соотношением.

4. Ва и Sr являются структурными примесями в главных породообразующих минералах Элисенваарского комплекса, изоморфно замеща К в "ортоклазовой" фазе МПШ и биотите-флогопите. В процессе становления комплекса содержания этих элементов в названных минералах закономерно уменьшаются.

5. Поведение Ва и Sr в процессе становления Элисенваарского интрузивного комплекса контролируется их кристаллизационным фракционированием. Это подтверждается закономерными изменениями величин K/Ba, Ca/Sr, Ba/Rb и других индикаторных отношений для данных пород, направленным изменением содержаний указанных элементов в калиевых породообразующих минералах комплекса (полевой шпат, слоды), а также результатами математического моделирования процесса фракционной кристаллизации.

Благодарности. Автор сердечно благодарит за содействие в подготовке и написании настоящей работы: В.Ф.Барабанова, Г.Н.Гончарова, В.С.Волкова, В.В.Гавриленко, В.В.Семенову, В.В.Трофимова, О.Г.Сметанникову, Э.А.Гойло, А.В.Сергеева, С.А.Светова, А.И.Слабунова, Н.Е.Король, Н.С.Рудашевского (микронд), В.И.Кевлича (подготовка части проб), В.В.Иващенко. Особую признательность за советы и практическую помощь автор выражает сотрудникам лаборатории геодинамики и металлогении, к.г.-м.н. Р.А.Хазову, М.Г.Полову, Н.С.Бискэ и Г.М.Павлову. Автор высоко ценит помощь научного руководителя диссертационной работы, д.г.-м.н., заведующего кафедрой

геохимии СПбГУ В.В.Гордиенко и благодарит его за внимание и советы в процессе подготовки и написания диссертации.

#### Первое защищаемое положение

*Элисенваарский интрузивный комплекс ладогалитов-тенсбергитов Западного Приладожья принадлежит магматическим щелочно-ультрамафитовым породам калиевого ряда, характеризующимся аномально высокими содержаниями Ва и Sr при пониженном содержании Rb.*

Комплекс ладогалитов-тенсбергитов Западного Приладожья (местное название) представлен Элисенваарским массивом, залегающим среди свекофенских гнейсов и сланцев сортавальской серии, а также прорывающих их интрузивных габбродиабазов (дайки), габбро и диоритов. Возраст регионального метаморфизма указанных вмещающих пород оценивается в  $1770 \pm 50$  млн. лет, а возраст пород комплекса определяется как постсвекофенский с имеющимися абсолютными значениями:  $1450 \pm 230$  (Pb-Pb метод по 4 пробам апатита),  $1550 \pm 110$  (Pb-Pb метод по 2 пробам апатита и 2 пробам микропертитового Ва-Sr-содержащего K-Na полевого шпата) и др. (Хазов и др., 1993).

Расчет с привлечением метода регрессионного анализа индекса Пикока (массовое содержание  $\text{SiO}_2$ , при котором содержания CaO и  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  становятся одинаковыми) для двух выборок пород Элисенваарского комплекса, различающихся соотношением некоторых минералов, в частности, породообразующих микропертитовых и антимикропертитовых полевых шпатов (с различной формой пертитов), гомогенного калишпата и кислого плагиоклаза, а также содержаниями Ва и Sr, дал близкие значения, соответственно, 47.36 и 47.86. Эти значения ( $< 51$ ) позволяют отнести все эти породы к щелочным.

Поддавливающее количество фигуративных точек, характеризующих составы пород Элисенваарского комплекса на бинарной диаграмме  $\text{SiO}_2$ - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  ("Классификация и номенклатура...", 1981), располагаются выше верхней границы поля распространения субщелочных пород. И только 4-5 % точек, характеризующих составы некоторых ладогалитов и сиенитов ( $\text{SiO}_2 > 51$  масс. %), лежат ниже нижней границы распространения бесфельдшпатоидных щелочных пород, содержащих щелочные пироксены и амфиболы.

Как показал анализ содержаний щелочных компонентов (диаграмма  $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$ ), ладогалиты относятся в основном к калиевому ряду (серия) щелочных пород ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 1$ ), а тенсбергиты - к калиево-натриевому ( $0.4 < \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 1$ ). Часть дайковых ладогалитов с содержаниями  $\text{SiO}_2 = 41.35 - 50.6$

масс. % выделяются также в калиево-натриевой серии ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ ). Фигуративные точки, характеризующие составы пород с преобладанием микропертитового полевого шпата над гомогенным калишпатом и плагиоклазом ("чистая линия") на диаграмме С.Р.Тейлора (с дополнениями Р.Ле Метра, Дж.Беллини, М.Ле Ба и др.)  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  ложатся выше линии, разделяющей высококалиевые и нормальнокалиевые магматические породы, а часть их (с  $\text{SiO}_2 > 48$  масс. % и  $\text{K}_2\text{O} > 3.6$  масс. %) находится, к тому же, в поле пород шощонитовой серии.

Содержания Ва и Sr в породах Элисенваарского комплекса аномально повышены до 2 масс. % каждого. Содержания Rb в них не превышают 300 г/т, достигая максимальных значений в наиболее поздних продуктах магматической кристаллизации - нордмаркитах и щелочных гранитах, а также некоторых метасоматизированных ладогалитах. Среднее содержание Rb для ладогалитов и тенсбергитов по 162 анализам составляет 82 г/т.

Сравнительный петрохимический анализ пород Элисенваарского комплекса с другими щелочно-ультрамафитовыми породами калиевого ряда указывает на их наибольшее сходство по химическому составу с калиевыми щелочными породами Западной рифтовой зоны Восточно-Африканской рифтовой системы. Последние, тем не менее, характеризуются резко пониженными относительно ладогалитов и тенсбергитов содержаниями Ва (до 2380 г/т), Sr (до 2540 г/т) и повышенными - Rb (средние содержания от 124 до 337 г/т).

Между калиевыми магматическими породами Западного Приладожья и лампроитами Австралии сходства по петрохимическим данным практически не установлено.

#### Второе защищаемое положение

*Ведущая роль в распределении главных петрогенных элементов в ряду последовательных фаз внедрения Элисенваарского комплекса принадлежит процессам фракционной кристаллизации. Перераспределение компонентов в связи с автометасоматическими и поздними гидротермальными процессами в породах комплекса проявлено незначительно.*

Проведенный во 2 главе диссертации факторный анализ поведения главных и сопутствующих ( $\text{P}_2\text{O}_5$ , ВаО, SrО, Rb<sub>2</sub>О, Li<sub>2</sub>О, F, ZnО) компонентов в ходе становления Элисенваарского комплекса подтвердил существование единого петрохимического ряда, характеризующего последовательную смену пород от наиболее меланократовых (невоиты, меланолодогиты), через мезократовые (мезолодогиты), к лейкократовым (лейколадогиты, тенсбергиты,

нордмаркиты). Названный ряд отвечает структуре I фактора изменчивости состава системы с весом 60.5 % и выглядит следующим образом: CaO(94) - MgO(94) -  $\text{P}_2\text{O}_5$ (89) - FeO(86) - TiO<sub>2</sub>(78) - MnO(67) - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(55) - lgK<sub>2</sub>O (-69) - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(-87) - Na<sub>2</sub>O(-91) - lgSiO<sub>2</sub>(-96). Этот фактор составляют типичные фемафильные элементы - Ca, Mg, Fe, Ti, имеющие с ним положительные связи. и типичные литофилы - Si, Al, Na и K, связанные с I фактором сильными отрицательными значениями факторных нагрузок.

Фемафильную группу компонентов по данным факторного анализа дополняют P, F, Li, Zn и Ba, что соответствует их накоплению в наиболее меланократовых породах (невоитах и меланолодогитах). По направлению к тенсбергитам и нордмаркитам их содержания падают, что особенно хорошо заметно для P, F и Li. Sr к I фактору индифферентен.

Выделение Sr и Ba в самостоятельный, второй по весу (около 13 %), фактор, как показано ниже, определяется вариациями минерального состава пород Элисенваарского комплекса и не может служить указанием на отсутствие связи распределения этих элементов с процессом фракционной кристаллизации.

Факторы более низких порядков (с весом менее 10 %) отражают влияние второстепенных причин вариаций химического состава системы, проявленных в пределах комплекса весьма незначительно (изменение парциального давления O<sub>2</sub>, процессы автометасоматоза - биотитизация, калишпатизация, гидротермально-метасоматические преобразования пород).

#### Третье защищаемое положение

*Основным минералом-носителем Sr в ладогалитах является микропертитовый Ва-Sr-содержащий K-Na полевой шпат (МПШ), а Ва - МПШ и слюды (данные минерального баланса). Распределение и содержания Ва, Sr и Rb в породах Элисенваарского комплекса определяются составом присутствующих минералов и их количественным соотношением.*

Для расчета минерального баланса Ва и Sr выбраны два типичных ладогита с близкими содержаниями  $\text{SiO}_2$  - 41.02 и 41.4 масс. %, но различными отношениями  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (0.66 и 0.3, соответственно), содержаниями  $\text{K}_2\text{O}$  (3.6 и 5.53 масс. %) и MgO (5.7 и 8.52 масс. %), что объясняется резко повышенным содержанием биотита во второй пробе.

Погрешность баланса для Ва составила от +0.3 до +6 %, для Sr от -18 до +4 %. Это свидетельствует о высокой достоверности полученных исходных данных как в отношении содержаний рассматриваемых элементов в отдельных минералах и породах в целом, так и в отношении содержаний самих минералов в породах. Следует подчеркнуть, что во всех случаях погрешности баланса по

Ва имеют положительные значения, а это в свою очередь говорит о том, что ни один из возможных минералов-концентраторов Ва не был пропущен. Относительно высокая отрицательная погрешность баланса Sr в одной из проб (-18 %) скорее всего связана с недоопределением в валовом составе породы целестина - наиболее вероятного концентратора Sr.

Полученные данные свидетельствуют, что главными минералами-концентраторами Ва в ладогитах являются МПШ (2.4 и 3 масс. %), биотит (1.65 и 0.97 масс. %) и амфибол (0.21 масс. %), а Sr - МПШ (1.9 и 1.9 масс. %), апатит (1.6 и 1.5 масс. %), ортит (0.78 масс. %), амфибол (0.33 масс. %) и сфен (0.29 масс. %).

Основную роль в балансе Ва в породах Элисенваарского комплекса играют (% от общего содержания элемента в породе): МПШ (66 и 54) и биотит (33 и 46), а Sr - МПШ (85 и 79). При уменьшении содержания полевого шпата и увеличении содержания биотита в породе роль последнего относительно роли полевого шпата в распределении Ва несколько возрастает. В этом же направлении возрастает и доля апатита в балансе Sr (с 9 до 18.5 %).

Таким образом, распределение и содержания Ва, Sr, Rb и ряда других элементов в породах Элисенваарского комплекса зависят, с одной стороны, от состава минералов, который закономерно меняется во времени в сторону уменьшения содержаний Ва и Sr и увеличения - Rb, а с другой стороны - от количественного соотношения минеральных фаз.

#### Четвертое защищаемое положение

*Ва и Sr являются структурными примесями в главных породообразующих минералах Элисенваарского комплекса, изоморфно замещая К в "ортоклазовой" фазе МПШ и биотите-флогопите. В процессе становления комплекса содержания этих элементов в названных минералах закономерно уменьшаются.*

Наибольший интерес для изучения поведения Ва и Sr в ходе формирования пород Элисенваарского комплекса представляют породообразующие микропертитовый K-Na полевой шпат и стюда.

Ва-Sr-содержащий микропертитовый K-Na полевой шпат присутствует в породах Элисенваарского комплекса в следующих количествах (об. %): невоиты (до 25), ладогиты (20-75), тенсбергиты (70-90), нордмаркиты (45-60). В щелочных гранитах он полностью сменяется микроклином, микроклинпертитом и альбитом.

Микрозондовые и рентгенометрические исследования МПШ показали, что Ва и Sr концентрируются в его "ортоклазовой" моноклинной фазе, а триклинная фаза представлена практически чистым альбитом.

Сравнительное рентгенометрическое изучение полевых шпатов из пород Элисенваарского комплекса и располагающегося в 20 км от него в пределах единой зоны глубинных разломов Оярвинского гранодиорит-сиенитового массивов показали, что "ортоклазовая" фаза элисенваарских МПШ менее упорядочена ( $t_1=0.66-0.76$ ), чем калиевый полевой шпат из сиенитов, кварцевых сиенитов и гранитов Оярви ( $t_1=0.79-0.90$ ). Это связывается с различием в содержаниях Ва и Sr, которые для этих полевых шпатов пересчитывались на рентгеновскую "ортоклазовую" фазу и составили в ней, соответственно: 0.44-5.53 и 0.51-6.74 масс. % - для Элисенваарского массива и 0.35-0.84 и 0.14-0.88 масс. % - для Оярвинского.

Аналогичная закономерность установлена и в отношении положения на дифрактограммах рефлекса  $\bar{2}01$ , зависящего от содержания изоморфных примесных элементов в калиевых и натриевых полевых шпатах. Показано, что углы  $2\theta_{\bar{2}01}$  "ортоклазовой" фазы элисенваарских МПШ характеризуются большими значениями (21.08-21.18, для полевого шпата из позднего жильного кварцевого сиенита - 21.03), чем оярвинских калишпатов (21.01-21.05).

Закономерные различия изученных калишпатов наблюдаются также по параметру  $a$  (8.511-8.539 Å - для элисенваарских и 8.567-8.596 Å - для оярвинских образцов) и объему элементарной ячейки  $V$  (соответственно, 716.9-718.3 и 720.5-722.8 Å<sup>3</sup>).

И, наконец, калишпаты из пород Элисенваарского комплекса имеют большие значения показателя светопреломления  $n_x$  (1.529-1.536), чем калишпаты из пород Оярвинского массива (1.521-1.526). Для первых отмечается прямая корреляционная зависимость между показателем преломления  $n_x$  и рассчитанным суммарным содержанием Ва и Sr в "ортоклазовой" фазе ( $r=0.85$  при критическом значении  $r_{0.95}=0.63$ ), а также величиной  $2\theta_{\bar{2}01}$  "ортоклазовой" фазы ( $r=0.92$  при том же критическом значении  $r$ ).

Корреляционный анализ величин рентгенометрических характеристик ( $t_1$  и  $2\theta_{\bar{2}01}$ ) "ортоклазовой" фазы МПШ с содержаниями в ней Ва и Sr показал наличие сильной положительной корреляционной связи между содержаниями самих Ва и Sr в рассматриваемой "ортоклазовой" фазе ( $r=0.79$ ), а также содержаниями этих элементов и величиной угла отражения  $2\theta_{\bar{2}01}$  ( $r=0.60$  - для Ва и  $r=0.79$  - для Sr). Еще более сильная отрицательная связь существует между содержаниями Ва и Sr в "ортоклазовой" фазе МПШ и значением  $t_1$  ее Al-Si упорядоченности (соответственно, -0.76 и -0.83). Между рентгенометрическими характеристиками ( $t_1$  и  $2\theta_{\bar{2}01}$ ) устанавливается тесная отрицательная связь:  $r=-0.76$ . (Для всех этих коэффициентов критическим при 95%-м уровне

значимости является  $r=0.42$ ). Перечисленные выше факты говорят о структурной природе примеси Ba и Sr в "ортоклазовой" фазе МПШ.

В работе показано, что содержания Ba и Sr в МПШ направлено и закономерно снижаются по мере увеличения кремнекислотности системы. Также закономерно и направлено от ранних продуктов кристаллизации к более поздним растет упорядоченность их "ортоклазовой" фазы.

В то же время увеличение кремнекислотности магматического расплава практически не влияет на изменение Ba/Sr отношения в МПШ, что подтверждается отсутствием корреляции с содержаниями  $\text{SiO}_2$  в породах ( $r=-0.12$ ). Между содержаниями Ba и Sr, с одной стороны, и Ba/Sr отношением, с другой, также нет значимой корреляции: соответственно, 0.31 и -0.42 при критическом значении  $t_{0.95}=0.50$ . Эти обстоятельства говорят об одинаковой направленности поведения Ba и Sr при кристаллизации полевых шпатов в ходе магматической дифференциации и второстепенности возможных отклонений от данной тенденции. Корреляционная связь Ba со Sr в элисенваарских полевых шпатах довольно сильная ( $r=0.75$  при критическом значении 0.42 для 95%-го уровня значимости).

В полевых шпатах из элисенваарских пород наблюдается антагонизм Ba и Rb ( $r=-0.78$ ), Ba и K ( $r=-0.86$ ), Ba и K/Ba ( $r=-0.84$ ), положительная корреляция между Ba и Ba/Rb ( $r=0.93$ ), Ba и K/Rb ( $r=0.80$ ), Ba и Na/K ( $r=0.78$ ). Последнее соотношение свидетельствует о направленном изменении температурного режима при кристаллизации полевых шпатов. У Ba с Na обнаруживается прямая корреляция, но заметно более слабая ( $r=0.60$ ), ниже уровня значимости при 95 % степени надежности, между Ba и Li корреляция отсутствует ( $r=-0.06$ ).

Аналогичное поведение в рассматриваемых полевых шпатах присуще и стронцию. Для Sr установлены следующие коэффициенты корреляции ( $r$ ): с Rb (-0.77), K (-0.81), K/Ba (-0.83), Ba/Rb (0.83), K/Rb (0.72), Na/K (0.73). Корреляция между Sr и Na ( $r=0.60$ ) опускается ниже уровня значимости, а для пары Sr-Li она вообще отсутствует ( $r=-0.11$ ). Для всех приведенных значений коэффициента корреляции критическим при 95%-м уровне значимости является  $r=0.67$ .

Указанные корреляционные взаимоотношения связаны с общей спецификой магматической дифференциации, отмечаемой в пределах Элисенваарского массива, когда в наиболее ранних генерациях полевых шпатов сосредотачивается относительно больше Ba, Sr и Na (последний, в конечном итоге, обособляется в микропертитах -), а K и Rb концентрируются в самых поздних полевых шпатах, накапливаясь к концу магматической деятельности,

Вариации содержания слюд, представленных флогопитом и магнезиальным биотитом, в породах Элисенваарского комплекса находятся в широких пределах как в направлении от наиболее меланократовых разновидностей (невоитов - 10-45 об. %) к наиболее лейкократовым (сиенитам и нордмаркитам - 0-10 об. %), так и в отдельных группах ладогалитов, характеризующихся сходным химическим составом. Например, в ладогитах содержания биотита колеблются от 3 до 60 об. %. Последнее обстоятельство может быть связано с избирательной отсадкой биотита из магматического расплава вследствие изменяющихся под влиянием летучих компонентов условий магматической кристаллизации. Частично указанные вариации содержания слюд связаны с присутствием в некоторых ладогалитах в целом мало в них распространенного наложенного мелкочешуйчатого биотита.

Полученные в ходе исследований данные свидетельствуют в общем случае о росте железистости первичных слюд во времени по мере увеличения кремнекислотности кристаллизующейся системы. Соответственно в них направлено уменьшается отношение Mg/Fe: 2.04 (флогопит из невоита)  $\rightarrow$  1.62 (магнезиальный биотит из ладогита)  $\rightarrow$  1.34 (биотит из сиенита)  $\rightarrow$  0.84 (магнезиально-железистый биотит из нордмаркита).

Данные микронзондового анализа показывают, что Ba входит в состав слюд изоморфно, поскольку какой-либо самостоятельной фазы этого элемента в виде механической примеси при данном анализе обнаружено не было. Содержания BaO в биотитах и флогопитах по данным микронзонда колеблются от 0.20 до 1.15 масс. %.

Изменение содержания Ba в слюдах связано с вариацией содержания  $\text{SiO}_2$  в породе. Также как и в МПШ количество Ba в них закономерно и направлено уменьшаются от ранних к более поздним продуктам кристаллизации. Противоположную направленность имеет в слюдах вариация содержания Rb, связанных отрицательной корреляционной зависимостью с содержаниями в них Ba ( $r=-0.79$ , критическое значение  $r=0.53$  при 95%-м уровне значимости). Соответственно величина Ba/Rb отношения в слюдах из пород Элисенваарского комплекса сильно падает (с 128 до 1.6), причем это происходит закономерно и направлено с ростом содержания в породе  $\text{SiO}_2$ .

#### Пятое защищаемое положение

*Поведение Ba и Sr в процессе становления Элисенваарского интрузивного комплекса контролируется их кристаллизационным фракционированием. Это подтверждается закономерными изменениями величин K/Ba, Ca/Sr, Ba/Rb и других индикаторных отношений для данных пород, направленным изменением содержания указанных элементов в каменных породообразующих минералах.*

комплекса (полевой шпат, слюды), а также результатами математического моделирования процесса фракционной кристаллизации.

Изучение закономерностей распределения Ba и Sr в породах Элисенваарского комплекса на основе вариаций K/Ba, Sr/Ba, Ca/Sr, K/Rb и Ba/Rb отношений показывает, что все они в целом соответствуют направленным изменениям этих параметров, свойственным магматической кристаллизационной дифференциации.

Характерной особенностью пород Элисенваарского комплекса является чрезвычайно низкое по сравнению с другими щелочными породами *K/Ba* отношение (1.79-21.07). Для последних Г.Майнел (1972) приводит величины *K/Ba* отношения примерно от 10 (щелочные базальты Восточно-Тихоокеанского хребта) до 100 (трахиты Австралии). Такое различие несомненно объясняется аномально высокими содержаниями Ba в ладогалитах и тенсбергитах.

В целом характер изменения *K/Ba* отношения в породах Элисенваарского комплекса соответствует дифференцированным магматическим сериям, образовавшимся из расплавов, изначально обогащенных летучими компонентами с низким *K/Ba* отношением (щелочные серии и серии дифференцированных гранитов). В таких сериях *K/Ba* отношение увеличивается во времени с ростом содержания в породах кремнекислоты, если в дальнейшем не происходит значительного поступления в систему летучих с низким *K/Ba* отношением.

Различия значений *K/Ba* отношения для некоторых сопоставимых по содержанию SiO<sub>2</sub> пород комплекса объясняются вариациями минерального состава в указанных породах. Поскольку основная масса Ba концентрируется в МПШ и биотите (см. выше), то появление в больших количествах других минералов в породах, в том числе кислого плагиоклаза и гомогенного калишпата, уменьшает в последних содержание Ba относительно К.

Полученные данные свидетельствуют, что на изменение *K/Ba* отношения влияют вариации концентраций в породе обоих элементов (Ba и К), однако роль Ba в этом процессе несколько выше вследствие его большей подвижности в системе по сравнению с К. Так, содержания К в породах Элисенваарского комплекса (для данной выборки) изменяются от 2.11 до 5.4 масс. % (в 2.56 раза), а Ba - от 0.2 до 1.8 масс. % (в 9 раз).

Практически полностью кристаллизационной дифференциацией определяется и вариация *Ca/Sr* отношения, которая соответствует распределению SiO<sub>2</sub> и Ca как главных компонентов-участников этого процесса. При этом величина *Ca/Sr* отношения в общем случае уменьшается по

мере увеличения кислотности пород. Таким образом, к концу магматического процесса происходит накопление Sr относительно Ca. Такая закономерность выявлена несмотря на полное отсутствие корреляции между Ca и Sr в рассматриваемых породах ( $r = -0.07$ ).

Рассмотренные выше закономерные и направленные изменения содержаний Ba, Sr и других элементов в МПШ и их "ортоклазовой" фазе, закономерное, направленное и взаимно противоположное изменение содержаний Ba и Rb в слюдах также свидетельствуют о ведущей роли кристаллизационной дифференциации при формировании пород Элисенваарского комплекса.

Дополнительная ценная информация, подтверждающая основную роль фракционной кристаллизации в распределении Ba и Sr в породах Элисенваарского комплекса получена благодаря известным из литературы (Кравченко, 1977; Кокс и др., 1982; Шинкарев, Иванников, 1983; Mason et al., 1985; Расс, Лапутина, 1995 и др.) коэффициентам распределения этих элементов, а также современным представлениям о составе верхней мантии и условиям формирования калиевых щелочных пород Западного Приладожья (Хазов и др., 1993 и др.). На основе этих данных были рассчитаны математические модели поведения Ba и Sr в ходе кристаллизационной дифференциации родоначальной ладогалитовой магмы, явившейся результатом частичного плавления гипотетической мантии Приладожья флогопит-клинопироксенового состава (Хазов и др., 1993). Подобная мантия, в свою очередь, могла быть следствием метасоматоза (флюидизации) истощенной мантии (Хазов и др., 1993) или следствием возможной неоднородности последней (Эдгар, Арима, 1984). При расчетах за основу брались гипотетический минеральный состав мантии Приладожья, использованный в настоящей работе также при моделировании состава родоначальной ладогалитовой магмы по петрогенным оксидам, об. %: клинопироксен - 50, флогопит - 41, апатит - 4, сфен - 3.5, магнетит - 0.5, другие - 1. (Следует отметить, что клинопироксен, флогопит и апатит являются главными и практически единственными минералами в составе флогопит-пироксеновых нодулей и чрезвычайно распространены в виде мегакристаллов (иногда > 10 см), включающих хадакристаллы (апатит), в эруптивных ладогалитовых брекчиях).

По результатам расчетов получены следующие комбинированные коэффициенты распределения Ba и Sr для указанного состава мантии:  $D_{Ba} = 2.57$  и  $D_{Sr} = 0.23$ . Таким образом, при частичном плавлении Ba накапливается в исходной породе, обогащенной флогопитом ( $K_{Ba} \gg 1$ ), а Sr - в образующемся расплаве ( $K_{Sr}$  для пироксена и флогопита  $\ll 1$ ).

По средним содержаниям Ba и Sr в мегакристах клинопироксена, флогопита и апатита для этого же состава мантии рассчитаны интегральные содержания этих элементов ( $C^E = \sum x_i C_i$ ) в плавившемся гипотетическом субстрате. Они составили:  $C_{Ba}^E = 0.94$  и  $C_{Sr}^E = 0.133$  масс. %. Эти значения приняты за  $C_0$  при расчетах содержаний Ba и Sr в родоначальной ладогалитовой магме. В расчетах использовалась формула для описания равновесного частичного плавления, предложенная Н.Ф.Шинкаревым и В.В.Иванниковым (1983):  $C_L/C_0 = 1/[D(1-F) + F]$ .

В табл. приведены результаты расчета  $C_L$  (содержание элементов в образующемся ладогалитовом расплаве) для 5-, 10-, 15- и 20%-го плавления (F).

Таблица

Содержания Ba и Sr в образующемся расплаве при частичном плавлении гипотетической метасоматизированной мантии Приладожья

Элемент	$C_0, \%$	$C_L, \%$				
		D	F=0.05	F=0.10	F=0.15	F=0.20
Ba	0.94	2.57	0.38	0.39	0.40	0.42
Sr	0.133	0.23	0.50	0.43	0.38	0.35

Полученные таким путем концентрации ( $C_L$ ) Ba и Sr приняты за  $C_0$  (концентрация соответствующего элемента в родоначальной магме) для расчета фракционирования изучаемых элементов по уравнению Рэлея-Макфи:  $C_L/C_0 = F^{D-1}$  (Шинкарев, Иванников, 1983). Расчеты проводились для 9 конкретных образцов пород Элисенваарского комплекса с широким спектром содержаний  $SiO_2$  (невонты - мелано-, мезо-, лейколадогиты - тенсбергиты - щелочные граниты). Для каждого изученного образца подсчетом в шлифе определялся количественный минеральный состав и, исходя из него, зная коэффициенты распределения Ba и Sr для всех главных и существенных минералов, присутствующих в породе, рассчитывались комбинированные коэффициенты распределения (D) этих элементов. Полученные коэффициенты как для Ba, так и для Sr оказались значительно  $> 1$ , что говорит об общей тенденции уменьшения их содержаний от ранних продуктов кристаллизации к более поздним. Основной вклад в эту тенденцию, как показали расчеты, вносят МПШ, для которого приняты коэффициенты распределения  $K_{Ba} = 7.4$  и  $K_{Sr} = 7.4$  (Mason et al., 1985) и биотит с  $K_{Ba} = 6.0$  (Кравченко, 1977). Рассчитанные по формуле  $C_L = C^E/D$  (Рябчиков, 1965) концентрации Ba и Sr в остаточном расплаве ( $C^E$  - содержания соответствующих элементов в породе, полученные

химическим анализом в ИГ КНЦ РАН), в целом направлены снижаются к концу магматического процесса, что подтверждает правильность полученных коэффициентов распределения. С данной тенденцией совпадает направленное сокращение рассчитанной по уравнению Рэлея-Макфи весовой доли остаточного расплава по отношению к первоначальному (F).

Исследования показали, что к завершающей стадии формирования Элисенваарского комплекса, которая представлена дайками и жилами гранитного состава, могло закристаллизоваться только около половины всей первоначальной выплавки из гипотетического мантийного субстрата. Это обстоятельство, хорошо согласуется с представлениями В.В.Гордиенко и др. (1983) о резко селективной экстракции всех *пирофильных* элементов (Ba, Sr и др.) в твердые фазы при частичной фракционной кристаллизации анатектической выплавки в виде гранит-аплита на начальных этапах пегматитообразования, в то время как *флюофильные* элементы (Rb и др.) еще сравнительно слабо успевают отфракционировать в кристаллизационный остаток. Подтверждением этой принципиальной схемы являются аномально повышенные содержания Ba и Sr и относительно пониженные содержания Rb в породах Элисенваарского комплекса (см. выше), а также сравнительно небольшие изменения содержаний Rb (53-193 г/т, в 3.7 раза) по сравнению с вариациями Ba (0.14-1.59 масс. %, в 11.4 раза) и Sr (0.085-1.27 масс. %, в 14.9 раза) в этих породах (по 9 модельным образцам, включая щелочной гранит). Заметно обогащенные Rb и другими флюофилами породы в пределах изучаемого комплекса практически не установлены.

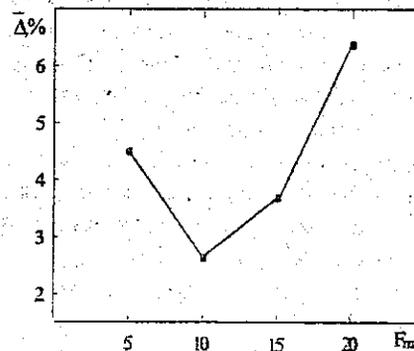


Рис. Зависимость величины среднего отклонения друг от друга ( $\Delta$ ) рассчитанных по "бариевой" и "стронциевой" моделям объемов остаточного расплава (F) от степени плавления первичного субстрата ( $F_{пл}$ )

Среднее отклонение между  $F_{пл}$  значениями F (доля остаточного расплава) в "бариевой" и "стронциевой" моделях по 9 образцам без учета 3-х "аномалий" минимально для 10-15%-й степени плавления (рис.). Такое же значение степени плавления получено при моделировании состава родоначальной магмы методом наименьших квадратов по петрогенным окислам. Рассчитанный этим методом состав родоначальной магмы

практически полностью совпадает с составами наиболее меланократовых пород Элисенваарского ладогалит-тенсбергитового комплекса.

Таким образом, при тщательном отборе образцов, максимально соответствующих первичным породам Элисенваарского комплекса, возможно построение количественной модели поведения Ba и Sr в ходе направленной кристаллизационной дифференциации и подтверждение на этой основе представления о магматическом генезисе указанных пород.

#### Заключение

Проведенное в настоящей работе изучение распределения Ba, Sr и сопутствующих элементов (Rb, Cs, Li, F и др.), а также вариаций индикаторных отношений (K/Ba, Ca/Sr, Ba/Rb, K/Rb и др.) в породах и минералах Элисенваарского щелочно-ультрамафитового интрузивного комплекса позволило сделать вывод о ведущей роли кристаллизационной дифференциации при фракционировании этих элементов из магматического расплава.

Основная информация о поведении Ba и Sr в ходе этого процесса получена на основе изучения их главных минералов-концентраторов и минералов-носителей (данные минерального баланса) - МПШ (концентратор Ba и Sr) и слюды - флогопита и биотита (концентратор Ba), в которых названные элементы являются структурными примесями, а также петролого-геохимическим моделированием.

Моделирование процесса кристаллизационного фракционирования Ba и Sr показало, что к завершающей стадии формирования Элисенваарского комплекса могло закристаллизоваться только около половины всей первоначальной выплавки из гипотетического мантийного субстрата. Степень его частичного плавления составила около 10-15 %, что соответствует расчетам по петрогенным окислам методом наименьших квадратов.

В ходе кристаллизационной дифференциации Ba и Sr как типичные *тирофильные* элементы резко селективно накапливаются в ранних продуктах кристаллизации, а Rb как типичный *флюофильный* элемент накапливается в остаточном расплаве, причем вариации содержания последнего в породах Элисенваарского комплекса менее интенсивны, чем вариации в них Ba и Sr.

#### Список работ автора, опубликованных по теме диссертации

1. "О геологических взаимоотношениях дайковых тел комплекса ладогалитов" // "Геология и петрология" (Опер.-информ. м-лы за 1987 г.). Петрозаводск, 1988, с. 55-58. Соавторы: Хазов Р.А., Бискэ Н.С., Железкин С.И., Ивонин З.И.

2. "Барий-стронцийсодержащие калиево-натриевые полевые шпаты Элисенваарского и Оярвинского массивов (Западное Приладожье)" // "Актуальные проблемы геологии, петрологии и геохимии Балтийского щита". Петрозаводск: Карельский научный центр АН СССР, 1990, с. 103-110.

3. "Щелочные комплексы Карелии, их рудоносность и локальное прогнозирование (Северная Карелия, Приладожье)". Петрозаводск. Отчет по разделу II - "Приладожье". Институт геологии. Фонды КНЦ РАН, 1990. Соавторы: Хазов Р.А., Попов М.Г., Бискэ Н.С., Кевлич В.И. и др.

4. "Кальций-барийсодержащий целестин гидротермальной минерализации ладогалит-тенсбергитового комплекса Западного Приладожья" // "Вопросы геологии и магматизма докембрия Карелии" (Опер.-информ. м-лы за 1991 год). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992, с. 56-58.

5. "Результаты факторного анализа данных по химическим составам пород ладогалит-тенсбергитового комплекса Западного Приладожья и связанных с ними метасоматитов" // "Вопросы геологии докембрия Карелии". Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1993, с. 60-69.

6. "Стронций и барий в ладогалитах и тенсбергитах Элисенваарского комплекса калиевых щелочных пород" // "Тезисы 7-й конференции молодых ученых "Геология Балтийского щита", посвященной памяти К.О.Кратца". 23-24 января 1993 г. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1993, с. 3-4.

159875K

