

## БУРАКОВСКО-АГАНОЗЕРСКИЙ РАССЛОЕННЫЙ МАССИВ ЗАОНЕЖЬЯ: I. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА РАССЛОЕННОЙ СЕРИИ ПЛУТОНА

© 2003 г. Г. С. Николаев\*, Д. М. Хворов\*\*

\*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
119991 Москва, ул. Косыгина, 19; E-mail: gsnik@geokhi.ru

\*\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
геологический факультет

119899 Москва, Воробьевы горы, МГУ; E-mail: dhvorov@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2001 г.

В работе представлены анализ и интерпретация петрогеохимической информации на основе данных по фазовому составу кумулатов. Предложена новая схема строения расслоенной серии плутона. Показано, что в разрезе расслоенной серии наблюдается последовательная смена зон: оливиновых, двупироксеновых, двупироксен-плагиоклазовых и магнетит-двупироксен-плагиоклазовых кумулатов. Эта смена зон отвечает порядку типоморфных кумулятивных парагенезисов, который, в первом приближении, можно принять за последовательность кристаллизации исходной магмы. Продемонстрировано, что в разных частях магматической камеры одновременно формируются породы с различными геохимическими характеристиками, обусловленными разной пористостью кумулятивного каркаса. Установлено, что зона двупироксеновых кумулатов осложнена горизонтом перидотитов и пачкой лейкоабброидов и анортозитов, причем появление перидотитов можно интерпретировать как результат дополнительного внедрения новой порции магмы. Пространственная приуроченность лейкоабброидов и анортозитов к породам максимального субсолидусного изменения (мономинеральные клинопироксениты) позволяет предположить общий внутрикамерный механизм их образования.

### СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

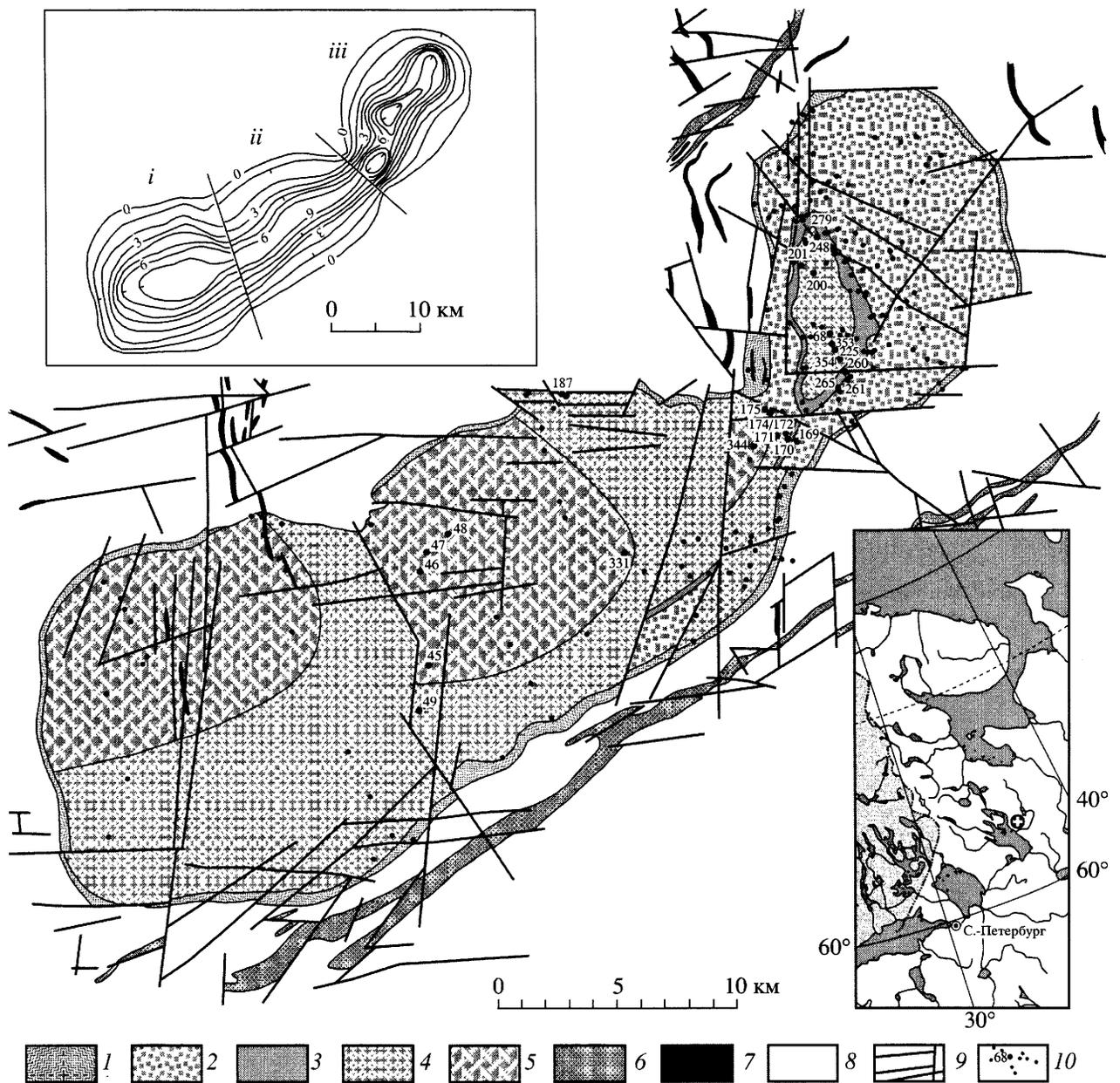
Раннепротерозойский Бураковско-Аганозерский интрузив расположен в Восточном Прионежье, в пределах Водлозерского блока Карельской гранит-зеленокаменной области в центральной части Бураковско-Монастырской проницаемой зоны среди тоналит-амфиболитовых комплексов нижнего и гнейсо-гранитов верхнего архея [1]. Это - крупнейший расслоенный комплекс в Евразии: площадь его эрозионного среза составляет более 630 кв. км. Интрузив практически целиком перекрыт мощным чехлом четвертичных отложений.

В плане массив вытянут в направлении СВ-ЮЗ (рис. 1). Разломы СЗ простирания разделяют его на три блока: Бураковский (юго-западный), Шалозерский (центральный) и Аганозерский (северо-восточный). Геолого-геофизическими исследованиями [2, 3] показано, что, имея в целом лополитообразную форму, интрузив отчетливо делится на две части: корытообразную, включающую Бураковский и Шалозерский блоки, и воронкообразную - Аганозерский блок. Карта изогипс подошвы массива, построенная по гравиметрическим данным, приведена на рис. 1 (врезка).

Максимальная глубина залегания подошвы интрузива наблюдается в воронкообразном Аганозерском блоке, мощность которого превышает 8 км. Для корытообразной части массива глубина залегания подошвы колеблется от 7.5 км в Бураковском до 6.5 км в Шалозерском блоках. По геолого-геофизическим данным [4] контакты интрузива с вмещающими породами резкие, причем южные и юго-восточные наклонены несколько круче (45-70°), чем северные и северо-западные (40-45°).

В пределах массива обнаружено хромитовое [5,6] и силикатно-никелевое оруденение [7]. В настоящее время массив рассматривается и как потенциально платиноносный [8-10]. Кроме того, вопросы становления столь крупного интрузива и формирования его геохимической структуры представляют большой теоретический интерес, поэтому неудивительно повышенное внимание к массиву исследователей и большое количество посвященных ему публикаций.

В строении интрузива выделяются породы Расслоенной серии, слагающие его основной объем, и породы Краевой группы. Для понимания строения вертикального разреза Бураковско-Аганозерского массива крайне важна схема стра-



**Рис. 1.** Схема геологического строения Бураковско-Аганозерского расслоенного плутона по [13] с изменениями и привлечением данных [31].

Породы плутона: 1 - краевая группа пород; зоны расслоенной серии: 2 - зона оливиновых кумулатов; 3 - зона двупироксеновых кумулатов; 4 - зона двупироксен-плагиоклазовых кумулатов; 5 - зона магнетит-двупироксен-плагиоклазовых кумулатов; дайковые комплексы: 6 - Коплозерско-Авдеевский ультраосновных-основных пород; 7 - Пудожгорский габброидный; 8 - вмещающие породы архея - протерозоя; 9 - разрывные нарушения; 10 - скважины и их номера; на врезке внизу кружком с крестом отмечено расположение плутона; на врезке сверху - рельеф дна магматической камеры по [2], изогипсы проведены через 1 км. Римскими цифрами обозначены: *i* - Бураковский, *ii* - Шалозерский, *iii* - Аганозерский блоки.

тификации пород расслоенной серии. Трудность ее построения заключается в том, что породы массива на поверхность практически не выходят и о строении интрузива можно судить только по кернам трех сотен скважин, расположенных очень неравномерно. К решению проблемы стра-

тификации этого расслоенного интрузива существуют три различающихся подхода.

На основании классического петрографического анализа пород М.М. Лавров [11,9], предложил схему стратиграфии расслоенной серии (снизу вверх): ультрабазитовая зона с нижней дунито-

вой (мощность не менее 3000 м) и верхней перидотитовой (около 400 м) подзонами; переходная зона (400 м), состоящая из двух лерцолит - верлит - пироксенит - габбро-норит - анортозитовых мегаритмов; габбро-норитовая зона с подзонами: нижней (650 м), средней (750 м), верхней (500 м); зона магнетитовых габбро-норитов (600 м).

Иной подход к стратификации расслоенной серии массива был предложен Е.В. Коптевым-Дворниковым [12-14]. Вслед за классическими исследованиями расслоенных интрузивов [15] в основу выделения зон был положен кумулятивный принцип, что придало стратиграфическим подразделениям генетический смысл. Границы зон проводились не по смене петрографического типа пород, а по устойчивому появлению в разрезе типоморфного кумулятивного парагенезиса. Кроме того, эти исследования знаменуют принципиально новый шаг в решении проблемы корреляции скважин массива. Впервые для стратификации, которая до этого проводилась только петрографически, были привлечены легко формализуемые данные по петрохимии пород. В породах расслоенной серии было выделено пять зон: ультраосновная зона (мощностью 3000-3500 м) с нижней подзоной дунитов и верхней подзоной пойкилитовых перидотитов (около 400 м); пироксенитовая зона (100-200 м); зона габбро-норитов с выделением нижней (полосчатой) (450 м) и верхней (650 м) подзон; зона габбро-норитов с инвертированным пижонитом (1150 м); зона магнетитовых габбро-норит-диоритов (760 м). Позднее у разных авторов, придерживающихся этого принципа стратификации, оценки мощностей зон незначительно менялись [8, 16-19], но сам подход оставался неизменным.

С.И. Корнеевым совместно с В.С. Семеновым [20-22] впервые для целей стратификации Расслоенной серии плутона были использованы данные полуколичественного спектрального анализа. В основу предлагаемой ими схемы была положена классификация пород массива, полученная в результате факторного анализа данных по содержаниям петрогенных окислов и элементов-примесей. Для Аганозерской и Шалозерско-Бураковской частей массива этими авторами были предложены несколько различающиеся схемы (в обобщенном виде, снизу вверх): ультраосновная зона, зона пироксенитов-1, зона габбро-норитов-1, зона пироксенитов-2, зона габбро-норитов-2, зона габбро-норитов-3, зона пижонитовых габбро-норитов, зона феррогаббро-норитов. По сути, эта схема аналогична предложенной М.М. Лавровым: зоны пироксенитов-1 и габбро-норитов-1 соответствуют первому мегаритму переходной зоны, а зоны пироксенитов-2 и габбро-норитов-2 - второму.

Первые две из рассмотренных схем строения массива основывались на предположении, что до-

полнительные внедрения новых порций магмы не играли существенной роли в процессе внутрикамерной эволюции магматической системы. Это позволяло в первом приближении считать интрузию одноактной. Появление новых результатов изотопно-геохимических исследований поведения редких и редкоземельных элементов в породах массива инициировало распространение представлений о гетерогенности Бураковской магмы [23], о многостадийности интрузии [17,18], о принадлежности Аганозерской и Бураковско-Шалозерской частей массива к разным интрузиям [20-22, 24]. Таким образом, в последнее время в петрологических исследованиях интрузива наметилась определенная тенденция усложнения механизмов, объясняющих его природу. Доводы в пользу многоактного формирования плутона можно разделить на несколько групп: структурно-геологические, петрографические, геохимические, изотопно-геохимические и геохронологические. Следует коротко остановиться на главных.

**Петрографические аргументы** основываются на наблюдениях о значительно большем распространении высоко-Са пироксена относительно низко-Са в Аганозерском блоке по сравнению с Шалозерским [22,24]. Здесь можно отметить, что в столь крупном плутоне, каким является Бураковско-Аганозерский массив, неизбежно существование в разных частях камеры различных физико-химических условий (давление, температура, соотношения жидкой и твердых фаз), которые могли влиять на процессы формирования породы на собственно магматическом или субсолидусном этапах. Нам представляется, что данное наблюдение само по себе, без детального анализа фазовой диаграммы, не может безусловно указывать на существование двух независимых интрузивов, представляющих продукты кристаллизации различных магм.

**Геохимические различия пород** блоков установлены по показателю общей железистости ( $f''$ ) [22] и валовым содержаниям лантаноидов [24]. Но валовые концентрации некогерентных элементов зависят главным образом от пористости кумулятивного каркаса. Нам представляется, что прямое сопоставление химизма кумулятивных пород без информации о составе захваченной (равновесной) жидкости некорректно. Попытка Г. Снайдера с соавторами [17] оценить редкоземельные характеристики расплава привела к геологически противоречивым результатам, т.к. при расчете баланса редких земель в исследуемых образцах не учитывался интеркумулятивный расплав. В результате в ядрах скважин наблюдается чередование пород, принадлежащих, по представлениям этих исследователей, двум магмам с разными редкоземельными характеристиками.

**Изотопно-геохимические данные** по  $\epsilon Nd$  [23, 22, 24] обычно привлекаются как наиболее весо-

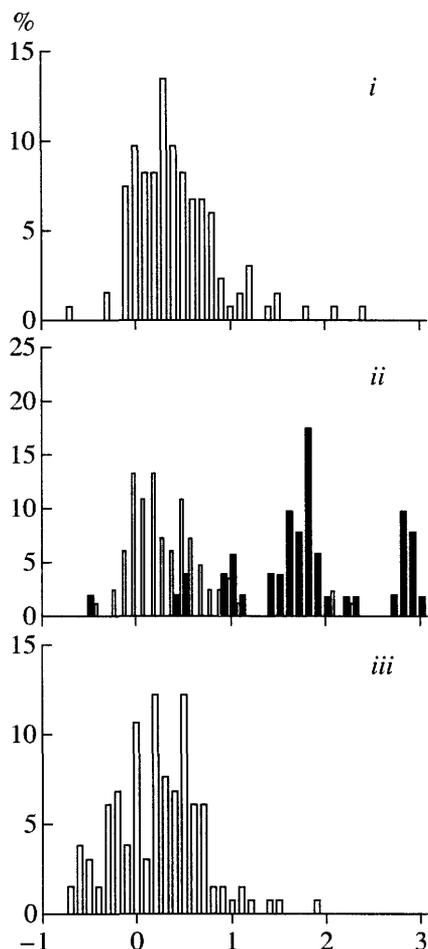


Рис. 2. Правильность используемых полуколичественных спектральных анализов, *i* - определения Ni ( $n = 133$  анализам), *ii* - Co, светлое - пробы с концентрациями менее 70 ppm ( $n = 82$ ), темное - 70 ppm и более ( $n = 51$ ), *iii* - Cr ( $n = 131$ ).

мый аргумент в пользу многофазности интрузива. В частности, при исследовании пород Аганозерского блока Ю.В. Амелин и В.С. Семенов установили вариации по  $\epsilon Nd_{(T)}$ , размах которых превышает единицу. Согласно корреляционной схеме, используемой этими авторами, скважины, по материалам которых были получены эти изотопные данные, надстраивают друг друга. Поэтому столь значительные различия изотопных характеристик интерпретировались как свидетельство образования Аганозерского блока в результате нескольких импульсов изотопно-гетерогенных магм.

Согласно нашим представлениям, изложенным ниже, эти скважины оказываются параллельными в разрезе плутона и, соответственно, разброс  $\epsilon Nd$  отражает его латеральную изменчивость на фоне однородных геохимических характеристик. В этом случае проблема интерпретации вертикальной неоднородности по  $\epsilon Nd$  сменяется вопросом о механизме формирования латераль-

ной изотопной зональности, решение которого надо искать в рамках внутрикамерного процесса. Таким образом, без разрешения этого противоречия генетические выводы о принадлежности массива к различным интрузивам, основанные на изотопных данных, являются преждевременными.

**Геохронологические аргументы** [24] основываются на абсолютных датировках пород Аганозерского и Шалозерского блоков Sm/Nd методом с разницей в 61 млн. лет. Необходимо заметить, что интервал неопределенности, вызванный только погрешностями экспериментальных измерений [25-28], положенных в основу принятой оценки константы полураспада  $^{147}\text{Sm}$  [29] для событий, происходивших 2.5 млрд. лет назад, составляет не менее 100 млн. лет. Поэтому этот аргумент также не является доказательным.

Мы полагаем, что для создания внутренне непротиворечивой петрологической модели массива необходимо решить проблему определения его структуры, попытаться оценить состав родоначальной магмы и условия ее кристаллизации, а также вклад субсолидусных процессов в формирование пород интрузива. Подобные исследования массива прежде всего опираются на интерпретацию строения его расслоенной серии. Этому вопросу посвящена данная публикация.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже упоминалось, для изучения массива Карельской геологической экспедицией ПГО Севзапгеология было пробурено около 300 скважин, глубина которых составляла обычно от 100 до 400 метров. Поскольку расположение скважин подчинялось, главным образом, поисковым задачам, материалом для нашего исследования послужили керны 160 наиболее представительных и петрологически информативных. В работе обобщена информация, полученная при петрографическом анализе нескольких сотен прозрачных шлифов, использовано около 2400 анализов проб на главные петрогенные элементы и более 10000 проб, проанализированных полуколичественным спектральным методом на Ti, Cr, Ga, Ni, V, Co, Sc<sup>1</sup>, которые были любезно предоставлены Карельской геологической экспедицией.

В качестве метрологической характеристики спектральных данных для ряда элементов была определена правильность анализа. С этой целью проведено сравнение имеющихся результатов с данными прецизионных определений Ni, Co и Cr, полученных Н.Ф. Пчелинцевой [личное сообще-

<sup>1</sup> Пределы обнаружения элементов в ppm: Ti - 100, Cr - 6, Ga - 2, Ni - 2, V - 4, Co - 0.9, Sc - 3. Анализы были выполнены методом просыпки в Центральной лаборатории Северо-Западного геологического управления.

ние]. Результаты расчетов, приведенные на рис. 2, показывают, что, несмотря на наличие определенных систематических отклонений, случайная составляющая ошибок в 70-80% случаев не выходит за пределы 40 отн. %, что только вдвое ниже требований к прецезионным анализам.

Серьезный недостаток, осложняющий интерпретацию природного материала, состоит в том, что опробование на разные виды анализа велось независимо друг от друга и в подавляющем большинстве случаев интервалы опробования не совпадают. В отличие от шлифов, которым может быть дана прямая генетическая интерпретация, ни петрохимические, а уж тем более геохимические анализы не могут быть непосредственно проинтерпретированы. В то же время надо учитывать, что объем химической информации на несколько порядков превосходит количество изученных шлифов и значительно легче формализуется, визуализируется и обобщается. Таким образом, на начальном этапе исследования возникла методическая задача интерпретации петрогеохимической информации на основе данных по фазовому составу кумулатов.

Для решения этой проблемы был предложен следующий путь. На основе петрографического анализа были выделены основные типы кумулятивных парагенезисов, встречающихся в породах массива. Используя затем эталонную выборку силикатных анализов проб, охарактеризованных петрографически, была разработана петрохимическая классификация, которая бы максимально соответствовала кумулятивной петрографической номенклатуре, применяемой в исследовании и имеющей генетический смысл. Все остальные пробы были привязаны к петрографически охарактеризованным. Эта основа позволила: стратифицировать керны скважин по петрохимическим признакам, выделив интервалы с преобладающим кумулятивным парагенезисом; опираясь на наиболее представительные стратифицированные скважины, провести анализ распределения второстепенных элементов; на основе результатов такого анализа петро- и геохимических параметров скоррелировать скважины и отстроить профильные разрезы.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Краткая петрографическая характеристика пород массива.

Следуя петрографической традиции для расслоенных интрузивов [30], в породах массива выделено две структурные группы минералов: к первой структурной группе отнесены идиоморфные и субидиоморфные индивиды, интерпретируемые как кумулятивные кристаллы, а ко второй - ксеноморфные зерна, каймы и ойкокрсталлы,

которые рассматривались как результат кристаллизации интеркумулятивного расплава. Среди пород массива по набору минералов первой структурной группы традиционно выделялись кумулятивные парагенезисы: *Ol*, *Chr-Ol*, *Chr-Ol-CPx*, *OPx-CPx*, *Opх*, *CPx*, *OPx-Pl*, *CPx-Pl*, *CPx-OPx-Pl*, *CPx-Pg-Pl*, *Mt-Pg-CPx-Pl<sup>2</sup>* [13, 14, 22]. При более детальном петрографическом анализе можно выделить еще ряд более редких кумулятивных ассоциаций, например, *Pl-Pg-Opх*, *Pg-Pl* [31]. По распространенности выделенные типы кумулятивных парагенезисов неравнозначны. Подавляющее большинство пород массива относится только к четырем из них:

- оливиновому,
- двупироксеновому,
- двупироксен-плаггиоклазовому и
- двупироксен-плаггиоклаз-магнетитовому.

Все остальные, по-видимому, возникают в результате осаждения и сортировки кристаллов на стадии формирования кумулуса и имеют второстепенное значение. Характерно, что при более тщательном петрографическом анализе практически в любом шлифе всегда можно найти один из четырех главных типоморфных наборов минералов, хотя некоторые из них представлены только единичными зернами.

Количественные соотношения кумулятивных фаз друг с другом и отношение кумулус-интеркумулус в породах массива колеблются в широких пределах. В силу этого мы не считаем целесообразным проводить какие бы то ни было параллели между кумулятивной и традиционной петрографической номенклатурой [30]. Названия индивидуальных пород полностью соответствуют петрографической традиции, поэтому один и тот же петрографический таксон может встречаться одновременно в разных разделах.

**Оливиновые кумулаты.** К этой группе отнесены дуниты, гарцбургиты, лерцолиты, верлиты, а также их хромитсодержащие разновидности. Это обычно темные зеленовато-серые, мелко- или среднекристаллические панидиоморфнозернистые или пойкилитовые массивные породы. *Ol* (60-98%) - идиоморфный или субидиоморфный, 1-3 мм в поперечнике, в большинстве случаев интенсивно серпентинизирован, иногда замещен идингситом. *OPx* и *CPx* (до 40%) ксеноморфны и часто замещаются баститом. В перидотитах они представлены изометричными ойкокрсталлами, размером до 50 мм. *Pl* (до 10%) образует мелкие интерстиции, которые иногда объединены в пау-

<sup>2</sup> Здесь и далее используются следующие обозначения минералов: *Ol* - оливин, *Chr* - хромшпинелид, *Px* - пироксен, *CPx* - клинопироксен, обычно авгит, *Opх* - ортопироксен, *Pg* - инвертированный пижонит, *Pl* - плаггиоклаз, *Mt* - титаномagnetит.

тинообразные ойкокрсталлы, часто замещается ярко-зеленым серпентин-хлоритом или бурым соссюритом. *Chr*, размером от 0.05 до 3 мм, представлен либо единичными ксеноморфными зернами, либо октаэдрическими кристаллами, составляющими первые проценты объема пород. В последнем случае *Chr* иногда наблюдается в качестве включений в краевых частях оливиновых зерен. Биотит (до 2%) обычно встречается в мелких интерстициях, реже образует ойкокрсталлы до 1.5 мм. Фрагментарно в породах группы распределены редкие зерна аксессуарных пентландита и халькопирита.

Для дунитов Аганозерского блока обычны адреже мезокумулаты, ортокумулаты встречаются фрагментарно только в пойкилитовых перидотитах. Интерстициальное пространство выполнено в большинстве случаев *CPx* и *Chr*, редко *Pl*. Породы, вскрытые на Шалозерском блоке, представлены только ортокумулатами, интерстиции которых заполняют *OPx*, *CPx*, *Pl* и *Chr*. Относительно других силикатных фаз *CPx* присутствует в подчиненном количестве. Для пород Шалозерского блока характерно повсеместное присутствие биотита.

**Двупироксеновые кумулаты** отличаются большим разнообразием пород и крайней неустойчивостью структурных и текстурных характеристик. В эту группу объединены верлиты, вебстериты, клино-, ортопироксениты, меланократовые габбро-нориты и их оливиновые разновидности, которые следует интерпретировать как переходные от оливиновых к двупироксеновым кумулатам. Это, как правило, зеленоватое-серые мелко-, средне-, крупнокристаллические панидиоморфнозернистые, реже гипидиоморфнозернистые с элементами резорбированной, псевдоморфной структур породы с массивной или линейной текстурой. *OI* (до 40%) имеет в поперечнике 0.5–3 мм. В большинстве случаев отличается округлыми очертаниями, вплоть до полной потери кристаллографической формы, часто интенсивно серпентинизирован вплоть до образования псевдоморфоз. Идиоморфный или субидиоморфный *CPx* (его до 90%) размером от 0.3 до 3.5 мм характеризуется наличием структур распада твердого раствора, иногда образует простые двойники. К ламелям низко-Са фазы часто приурочены ориентированные вдоль кристаллографических направлений выделения чистого хромита размером, не превышающим первых сотых долей мм. Минерал обычно слабо затронут вторичными изменениями и замещается светло-зеленой актинолитовой роговой обманкой. *OPx* (его до 75%) - идиоморфный или субидиоморфный, размером от 0.5 до 3.5 мм, иногда содержит каплевидные включения высоко-Са пироксеновой фазы распада твердого раствора. Иногда в породах наблюдается ксеноморфный гарризитоподобный инвертированный *Pg* (до 10%) с характерной "ельча-

той" структурой распада, причем в промежутках между ламелями матрица насыщена червеобразными неориентированными вростками высоко-Са пироксеновой фазы. Часто сростки зерен *Pg* погасают как один монокристалл, при этом ламели высоко-Са пироксена могут иметь как одинаковую, так и разную ориентировки. В *OPx* по микротрещинам развивается грязно-зеленый хлорит. Ксеноморфный *Pl* (до 40%) либо выполняет интерстициальные промежутки, либо образует таблитчатые ойкокрсталлы размером до 10 мм, иногда подвержен соссюритизации. В интерстициях могут присутствовать биотит и амфибол. Аксессуары представлены хромшпинелидом, апатитом, цирконом, магнетитом. Идиоморфный *Chr* размером от 0.1 до 0.3 мм заключен в интерстиционных зернах ортопироксена и плагиоклаза, а также иногда встречается в виде включений в краевых частях кристаллов оливина и клинопироксена. Особый интерес представляют установленные Е.В. Шарковым [32] практически мономинеральные гранобластовые часто крупнозернистые клинопироксениты с характерными зубчатыми, симплектитоподобными взаимными прорастаниями кристаллов. В таких породах широко развиты округлые или гантелеобразные кварц-карбонатные включения, размером от долей до 15 мм, выполненные кварцем, полевыми шпатами, карбонатом, тальком, амфиболами [22]. Эти образования встречаются как в виде включений в минералах, так и в интерстициях.

Среди пород Аганозерского блока преобладают бесплагиоклазовые разновидности со значительным доминированием *CPx* над *OPx*. Для пород Шалозерского блока, напротив, типичны плагиоклазодержащие разновидности со значительно более широким развитием *OPx*. Кроме того, в них практически повсеместно встречаются интеркумулятивные кварц, калиевый полевой шпат и биотит (до 3%). Характерно, что в породах этой части массива часто встречаются аксессуарные циркон и апатит, которые не найдены на Аганозерском блоке.

**Двупироксен-плагиоклазовые кумулаты** объединяют габбро-нориты, нориты и габбро. Это светло-серые с зеленоватым или коричневатым оттенком лейко-, реже мезократовые мелко-, среднезернистые, реже крупно- или разноезернистые породы с габбровой или габбро-офитовой структурами, которые часто обнаруживают элементы пойкилитовой или псевдоморфной. Как правило, они обладают массивной или слаботрахитоидной текстурой, реже встречаются трахитоидные разности. Субидиоморфный, редко идиоморфный *Pl* (его от 30 до 90%), размером 0.6–5.0, редко достигающий 7.0 мм по длинной оси, ориентирован субпараллельно, иногда образует хадакристаллы. Кристаллы плагиоклаза в большинстве случаев трещиноваты, по микротрещинам

развивается хлорит, иногда они сильно соссори-тизированы, серицитизированы, карбонатизированы или эпидотизированы. Мелкие призмы плагиоклаза часто включены в орто-, реже в клинопироксен, в свою очередь, отдельные крупные зерна плагиоклаза в краевых частях иногда содержат изометричные кристаллы орто- и клинопироксена, размером до 0.3 мм. Кристаллы *Pl* содержат включения игольчатого магнетита, ориентированного вдоль кристаллографических направлений [33]. Субидiomорфный *OPx* (до 40%), размером 0.7-3.5 мм интенсивно оталькован или серпентинизирован, иногда включает каплевидные, червеобразные неориентированные вроски высоко-Са пироксеновой фазы распада твердого раствора. В верхних частях разреза расслоенной серии преобладает "ельчатый" инвертированный *Pg*. Как и в двухпироксеновых кумулатах, зерна *Pg* часто образуют сростки, погасающие подобно монокристаллу. *CPx* (до 40%) - обычно гипидiomорфный, размером 0.3-2.5 мм. Иногда он образует корродированные хадакристаллы размером около 0.4 мм в ортопироксене, часто интенсивно замещается зеленой роговой обманкой. В породах верхних частей разреза часто наблюдаются кристаллы пироксена, в которых в пределах зерна изменяются пропорции сольвусных фаз: матрица высоко-Са пироксена с редкими ламелями низко-Са постепенно переходит в низко-Са пироксен с редкими ламелями высоко-Са. Кварц (до 4%) образует мелкие ксеноморфные зерна. Биотит (до 2%) размером до 1.0 мм, распределен фрагментарно, в интерстициях ассоциирует с резко ксеноморфным титаномагнетитом размером 0.3-1.5 мм. Акцессорные минералы представлены гранатом, хромшпинелидом, цирконом, рутилом, апатитом, флюоритом, халькопиритом, пентландитом, пиритом и пирротинном.

Для Аганозерского блока характерно широкое развитие деформированных кристаллов плагиоклаза. В отличие от Аганозерского на Шалозерском блоке породы характеризуются высоким содержанием интерстициальных кварца, биотита, магнетита, а также апатита и циркона.

**Двухпироксен-плагиоклаз-магнетитовые кумулаты** объединяют габбро-диориты, габбро-нориты. Это - темно-серые слабо трахитоидные мелко-, средне-, крупнозернистые габбро-офитовые породы, проявляющие элементы псевдоморфной структуры. *Pl* (его от 40 до 75%) - субидiomорфный, реже идиоморфный, размером, как правило, 0.5-3 мм, иногда достигает 7 мм по длинной оси. *Pl* насыщен тонкоигольчатым магнетитом, по трещинам в нем развиваются альбит, хлорит, эпидот-цоизит, сульфиды. Субидiomорфный *CPx* (его от 10 до 30%), размером 0.8-4.5 мм местами замещается зеленой роговой обманкой и биотитом. Изометричный *Pg* (от 10 до 20%), размером

0.5-2.5 мм, часто образует сростки. Иногда он замещается тремолит-актинолитом. Так же как и в породах предыдущего типа, здесь часто встречаются зерна пироксена с переменными пропорциями сольвусных фаз. Субидiomорфный титаномагнетит (его от 3 до 15%), размером 0.3-1.7 мм, часто обнаруживает тонкие пластинки распада ильменита и каймы биотита. На долю кварца, биотита и калиевого полевого шпата приходится около 3%, причем ксеноморфный кварц (менее 1%), размером до 0.7 мм, встречается спорадически. Акцессорные представлены апатитом, халькопиритом и пирротинном.

Таким образом, петрографический анализ дает свидетельства достаточно продолжительной термической истории плутона, завершающейся широким развитием субсолидных процессов: деформации и перекристаллизации кумулятивных минералов, распадом твердых растворов пироксенов, выделением *Cr*- и *Fe*-содержащих фаз в клинопироксене и плагиоклазе, соответственно. Кроме того, в шлифах наблюдаются систематические различия пород, вскрытых в разных блоках. В отличие от адкумулатов Аганозерского блока, для пород Шалозерского характерны ортокумулаты с широким развитием низкотемпературных интеркумулятивных минералов: плагиоклаза в оливиновых и двухпироксеновых кумулатах, кварца, биотита, апатита, циркона, магнетита и калиевого полевого шпата. Эти наблюдения позволяют сделать предположение о большей пористости (residual porosity [34]) кумулятивного каркаса пород, вскрытых на Шалозерском блоке, по сравнению с Аганозерским.

#### **Особенности геохимии петрогенных элементов в породах плутона.**

Для интерпретации наблюдаемых вариаций главных породообразующих элементов необходимо разработать способ разделения имеющихся петрохимических данных на группы, соответствующие главным типам кумулятивных парагенезисов, выделенных в результате петрографического анализа. Для этого была предложена математическая процедура типизации, использующая особенности имеющегося природного материала. Эталонная выборка проб, включающая только те анализы, которые сопровождаются шлифами, была разделена на группы в соответствии с петрографически определенными кумулятивными парагенезисами. Каждый химический анализ, состоящий из *n* элементопределений, был представлен в виде *n*-мерного вектора, нормированного на свою длину. Таким образом, выборку составов можно представить множеством точек на поверхности *n*-мерной гиперболы единичного диаметра. Для каждой такой точки на поверхности гиперболы может быть задана некоторая  $\epsilon$ -окрестность. Два состава, эталонный и тестиру-

емый, следует считать "идентичными", если расстояние  $\rho$  между ними окажется меньше  $\epsilon$ . Очевидно, что если значение  $\epsilon$  выбрать чрезмерно малым, то для ряда дискриминируемых анализов может не найтись аналога из эталонной выборки. С другой стороны, задание повышенного значения  $\epsilon$  может привести к ошибочной диагностике. Если многообразие составов в имеющейся эталонной выборке представлено достаточно полно, то разумно ограничиться такой величиной  $\epsilon$ , которая бы обеспечивала надежную диагностику составов в 85-90% случаев. Эмпирически найдено, что это условие выполняется, если  $\epsilon$  равна удвоенной погрешности силикатного анализа. При помощи этой процедуры была проведена типизация всего имеющегося массива петрохимической информации<sup>3</sup>. Анализы пород, принадлежащих разным блокам, обрабатывались отдельно.

В качестве величины, отражающей эволюцию пород интрузива, можно принять показатель валовой железистости породы  $f'$ , рассчитанный как атомное отношение  $Fe/(Fe + Mg)$ . В большинстве случаев этот параметр монотонно изменяется в ходе магматической эволюции и слабо зависит от соотношений в породе темноцветных железомagneзиевых минералов и фельдшпатоидов. На величину этого показателя влияет накопление в породах железистоокисных минералов, что вызывает его увеличение. Неравномерное распределение магнетита в породах Расслоенной серии может приводить к значительным колебаниям показателя валовой железистости по разрезу скважин. В этом случае, эффективными значениями  $f'$  как показателя эволюции следует считать нижнюю огибающую этих колебаний.

В качестве примера на рис. 3 приведены вариации содержаний  $SiO_2$  и  $FeO$  относительно  $f'$  в породах массива. На графиках наглядно показано последовательное увеличение этого показателя для пород, принадлежащих главным типам кумулятов от оливиновых через двупироксенные и двупироксен-плагиоклазовые к двупироксен-плагиоклаз-магнетитовым. Фигуративные точки, принадлежащие определенному кумулятивному парагенезису, образуют облака сублинейной формы, вытянутые вдоль линий фазового контроля соответствующей ликвидусной ассоциации, что мож-

но рассматривать как подтверждение правильности проведенной дискриминации составов.

Валовая железистость породы определяется составом и пропорциями слагающих ее фаз. Характерно, что в случае кумулятов количество захваченного интеркумулятивного расплава оказывает на этот показатель значительно большее влияние, нежели пропорции силикатных минералов в кумулятивном каркасе, поскольку величины отношения  $Fe/Mg$  в сосуществующих оливине и пироксенах различаются незначительно, но всегда существенно ниже, чем в равновесном расплаве.

Эту особенность поведения величины  $f'$  надо иметь в виду при интерпретации петрохимических данных по отдельным блокам массива. В отличие от Аганозерского блока, породы Шалозерско-Бураковской части массива имеют систематически более высокий показатель валовой железистости: оливиновые кумуляты характеризуются значениями  $0.13 \pm 0.03$  и  $0.18 \pm 0.03$ , двупироксеновые кумуляты -  $0.18 \pm 0.03$  и  $0.25 \pm 0.05$ , двупироксен-плагиоклазовые, не содержащие пироксена -  $0.24 \pm 0.04$  и  $0.35 \pm 0.07$ . Кроме того, обращают на себя внимание систематически более высокие содержания титана. Гистограммы для одноименных пород, для которых этот элемент можно принять в качестве некогерентного, представлены на рис. 4.

Таким образом, факты систематических различий валовой железистости и содержаний титана в породах, принадлежащих разным частям массива, согласуются с предположением о разной пористости кумулятивного каркаса (количестве "захваченного" расплава), которое сформулировано на основании петрографического анализа. Этот вывод кажется оправданным и при сопоставлении расположения скважин с рельефом дна интрузивной камеры (рис. 1): более плотный кумулулус следует ожидать в центральных частях воронкообразного Аганозерского блока, а более "рыхлый" кумулятивный каркас - в периферических частях Шалозерского блока, имеющих пологий наклон дна. Данный результат имеет непосредственное отношение к попыткам прямого сопоставления петро-, геохимических характеристик пород Аганозерской и Бураковско-Шалозерской частей массива и интерпретации установленных различий с позиций разнообразия исходных магм. Очевидно, что "синхронные" (кристаллизующиеся из одного и того же расплава) породы разных блоков, в силу вариаций разных пропорций кумулулус-интеркумулулус, могут создавать иллюзию принадлежности к разным этапам эволюции одной магмы или даже к различным магмам.

#### **Особенности геохимии второстепенных и редких элементов в породах массива.**

Цель предлагаемого геохимического анализа состоит в разработке методики интерпретации

<sup>3</sup>Вданной работе в качестве расстояния между составами  $X$  и  $Y$  использовалась угловая метрика:  $\rho_{(X, Y)} = \sqrt{\sin^2 \Theta}$ , где  $\Theta =$

$$= \arccos \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i^2}}$$

а  $X_i$  и  $Y_i$  - молекулярные количества компонента  $i$  составов  $X$  и  $Y$

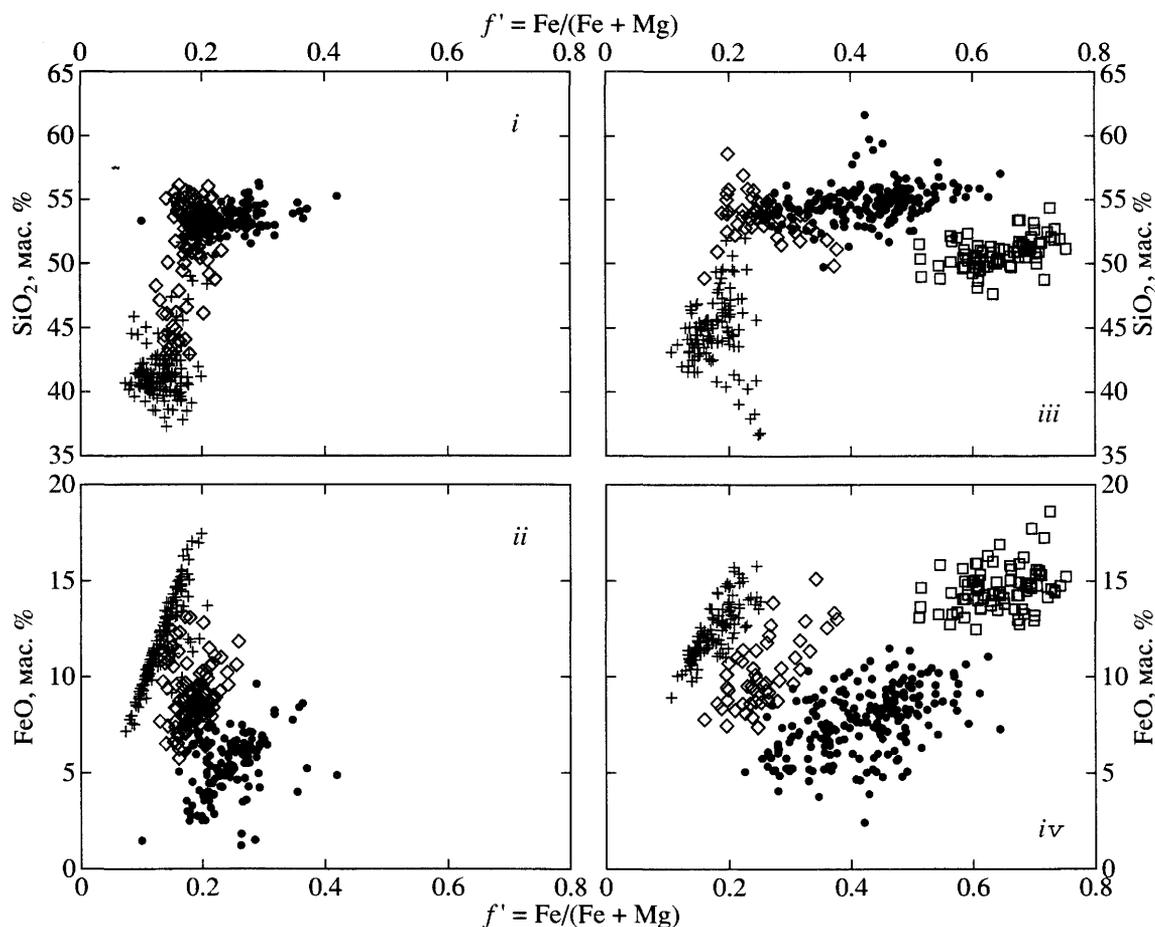


Рис. 3. Вариации главных породообразующих элементов в зависимости от показателя валовой железистости  $f'$  в породах Аганозерской (i-ii) и Бураковско-Шалозерской (iii-iv) частей массива.

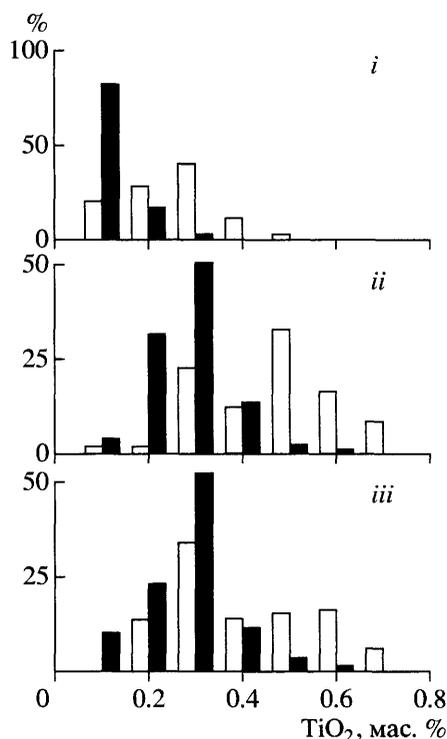
Условные обозначения фигуративных точек: кресты - оливиновые кумулаты, ромбы - дупироксеновые, кружки - дупироксен-плаггиоклазовые, квадраты - дупироксен-плаггиоклаз-магнетитовые.

имеющихся данных спектральных определений для индивидуальных проб. Этот подход основан на закономерностях распределения в породах элемент-примесей, которые могут быть в первом приближении описаны коэффициентами распределения минерал-расплав. Для последующего анализа стратиграфии пород расслоенной серии наибольшее значение имеют когерентные Ni, Co, Sr, Ti, V, Sc и Ga, накопление которых в большей степени зависит от пропорций минералов кумулуса.

Несмотря на значительные различия коэффициентов распределения этих элементов для породообразующих минералов, давать генетическое толкование непосредственно данным по распределению элементов по разрезу конкретной скважины достаточно трудно в силу их существенных колебаний. Поэтому при анализе данных были использованы не абсолютные значения содержания элементов, а их отношения. Переход к анализу отношений дает ряд преимуществ. Прежде всего, увеличивается контрастность графиков, связанная с более высокой чувствительностью геохими-

ческих отношений к пропорциям минералов концентраторов для выбранной пары химических элементов. В то же время "гасятся" вариации, обусловленные присутствием дополнительных минеральных фаз, допускающих эти элементы в структуру в минимальных количествах. В силу разной распространенности элементов их содержания в породах массива могут различаться на несколько порядков. Для того чтобы сделать эти величины сопоставимыми, они были нормированы на соответствующие коэффициенты: Ti, Mn, Sr, Ni нормированы на  $10^3$ , V, Co, Sr - на  $10^2$ , а Ga и Sc - на  $10^1$ . Все используемые отношения были приведены к единице.

Отношения элементов, которые преимущественно концентрируются в разных минеральных фазах, отражают пропорции этих минералов в породе. В соответствии со своими коэффициентами распределения V и Sc преимущественно накапливаются в высоко-Ca *Px*, а Ga в основном распределяется в *Pl* в силу этого отношения  $V/(Ga + V)$  и  $Sc/(Ga + Sc)$  отражают пропорции высоко-Ca *Px*



**Рис. 4.** Гистограмма содержаний титана в породах Аганозерской (темное) и Бураковско-Шалозерской (светлое) частей массива.

*i* - оливиновые кумулаты (628 и 114 ан. для Аганозерской и Бураковско-Шалозерской частей, соответственно), *ii* - двупироксеновые кумулаты (339 и 50 ан.), *iii* - двупироксен-плагиоклазовые кумулаты, не содержащие инвертированного пижонита (228 и 87 ан.).

и *Pf* Максимальные значения этих отношений должны соответствовать пироксенитам, а минимальные - содержащим плагиоклаз габброидам. При этом необходимо учитывать, что *V* имеет высокий коэффициент распределения между шпинелидами и расплавом, поэтому в случае присутствия в породах значительных количеств хромшпинелида или титаномагнетита это отношение уже не может быть однозначно интерпретировано. *Ni* в основном концентрируется в *Ol*, поэтому логично ожидать, что отношение  $Ni/(V + Ni)$  будет отражать соотношения *Ol* и высоко-*Ca Px*. Это отношение принимает максимальные значения в породах, сложенных преимущественно *Ol*, и минимальные - в безоливиновых кумулатах. Колебания этого отношения в породах, сложенных оливиновыми кумулатами, может происходить либо из-за присутствия в породе интеркумулятивного высоко-*Ca Px*, либо хромита.

Отношения элементов, преимущественно входящих в состав одного или нескольких минералов одновременно, определяются несколькими факторами: степенью эволюции расплава, формировавшего породообразующие минералы, соотношением

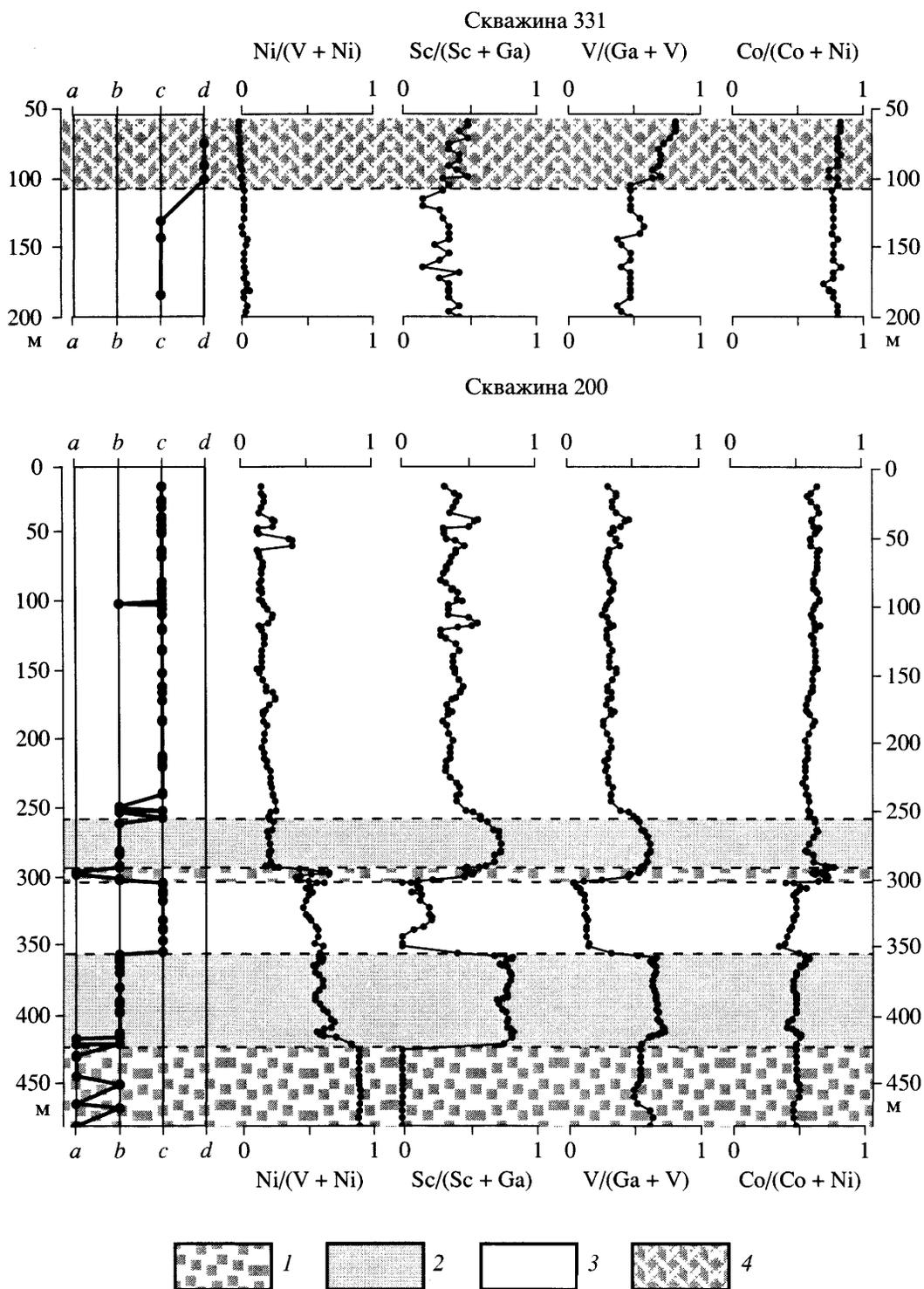
кумулус-интеркумулус и модального состава породы. Таким образом, вариации этих отношений в вертикальном разрезе можно использовать для корреляции скважин, наряду с петрохимическими показателями *f'* и *an'* [13, 14]. В нашем случае наиболее информативным является отношение  $Co/(Ni+Co)$  [35], которое чувствительно не только к определенным различиям поведения этих элементов в процессе кристаллизации основного минерала-концентратора (*Ol*), но также характеру эволюции расплава на заключительных стадиях. При этом надо учитывать, что наличие в породах сульфидной минерализации увеличивает валовые концентрации *Ni* в большей степени, чем *Co*, что может повлечь за собой резкие вариации и скачки соответствующих отношений.

Эффективность предлагаемого подхода можно продемонстрировать на примере скважин 200 и 331, так как в их ядрах наблюдается смена всех кумулятивных типов пород массива (рис. 5). Скважина 200 пройдена через двупироксен-плагиоклазовые, пироксеновые и оливиновые кумулаты Аганозерского блока и позволяет судить о закономерностях поведения элементов на ранних этапах эволюции магмы. Скважина 331, пробуренная на Шалозерско-Бураковском блоке массива, вскрывает переход от двупироксен-плагиоклазовых кумулатов к магнетит-двупироксен-плагиоклазовым и дает представление о соответствующих закономерностях на поздних этапах магматической эволюции. Совместно с вариациями отношений элементов-примесей на рис. 5 представлены результаты петрохимической типизации пород из этих скважин. Сопоставление графиков распределения петрохимических типов пород и геохимических данных весьма показательно и демонстрирует хорошее совпадение и значительно большую информативность геохимических показателей благодаря более частому опробованию.

#### **Корреляция скважин, реконструкция и анализ профильных разрезов Бураковско-Аганозерского интрузива.**

Изложенные выше геохимические принципы позволяют провести корреляцию скважин, реконструировать геохимическую структуру блоков интрузива и на этой основе предложить обобщенный разрез массива.

**Геохимическая структура Аганозерского блока.** При современном уровне эрозионного среза Аганозерский блок практически нацело сложен оливиновыми кумулатами. Все остальные дифференциаты составляют чуть более 1% объема и расположены в его центральной части, образуя вытянутую в субмеридиональном направлении мульду. Это геологическое тело формирует собственную замкнутую структуру, которая, благодаря большому объему буровых работ, хорошо проявлена на профильных разрезах. Многие



**Рис. 5.** Результаты петрохимической типизации и вариации отношений редких элементов в породах скважин 200 и 331. Результат петрохимической типизации: *a* - оливиновые кумулаты, *b* - двупироксеновые, *c* - двупироксен-плаггиоклазовые, *d* - двупироксен-плаггиоклаз-магнетитовые кумулаты.

1 - участки разреза с преобладанием оливиновых кумулатов, 2 - участки разреза с преобладанием двупироксеновых кумулатов, 3 - участки разреза с преобладанием двупироксен-плаггиоклазовых кумулатов, 4 - участки разреза с преобладанием двупироксен-плаггиоклаз-магнетитовых кумулатов.

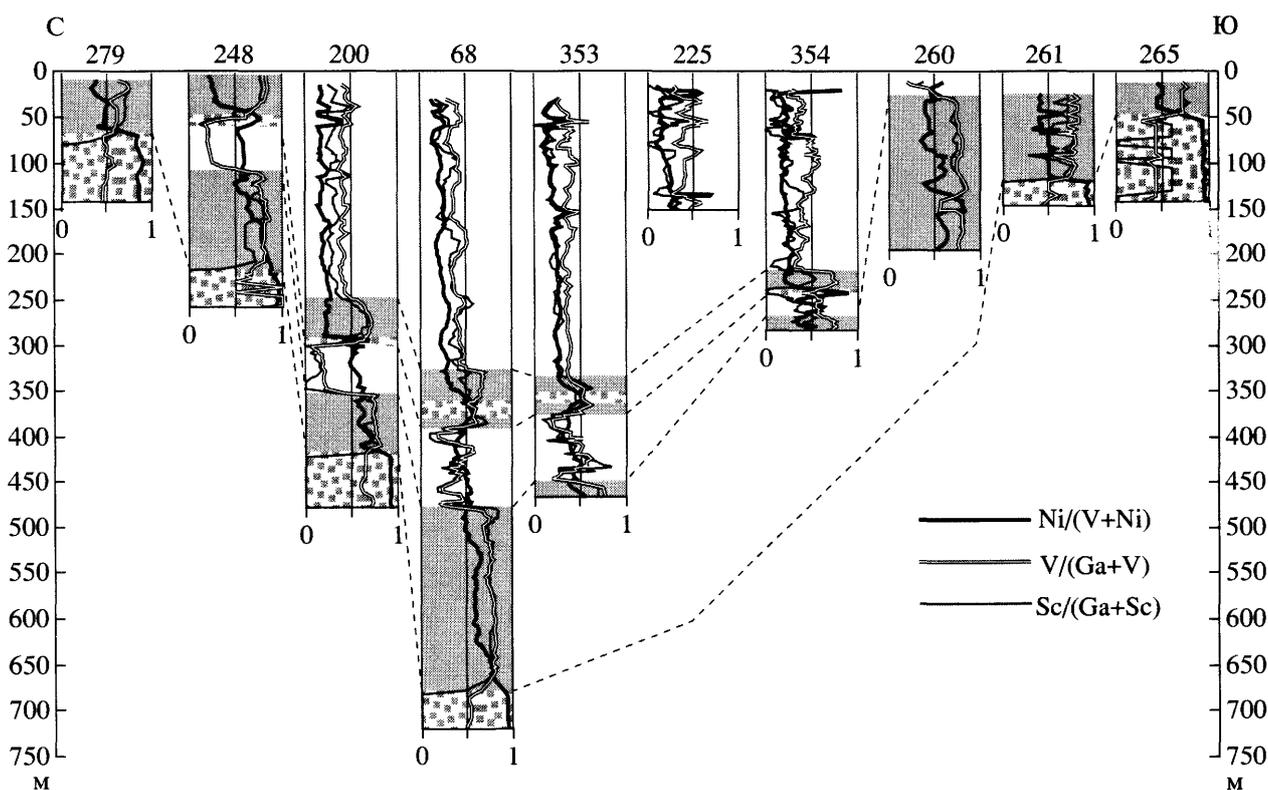


Рис. 6. Геохимическая структура Аганозерского блока, меридиональный геохимический профильный разрез. Условные обозначения на рис. 5.

скважины, вскрывающие породы мульды, заканчивались в подстилающих ее перидотитах, что облегчало определение их положения в структуре расслоенной серии.

Строение блока наглядно представляет субмеридиональный профиль (рис. 6). В отличие от традиционного литолого-петрографического профиля, отражающего вариации петрографических разностей, геохимический профильный разрез отражает распределение химических элементов в породах массива. В данном случае геохимическое поле массива отражают вариации трех отношений, представленных на графике. Такая геохимическая структура соответствует последовательности смены кумулатов: оливиновых, двупироксеновых и двупироксен-плагноклазовых. На протяжении всего профильного разреза прослеживается единая легко узнаваемая структура толщи двупироксеновых кумулатов: два  $V/(Ga + V)$  или  $Sc/(Ga + Sc)$  максимума разделены минимумом этих показателей. К низам верхнего максимума приурочен локальный максимум  $Ni/(V + Ni)$ . Таким образом, толщина двупироксеновых кумулатов осложнена пачками перидотитов и лейкократовых габбро-норитов - анортозитов. Для толщи двупироксен-плагноклазовых кумулатов характерны переменные-низкие значения отношения  $V/(Ga + V)$  и  $Sc/(Ga + Sc)$ , осложненные редкими

локальными максимумами  $Ni/(V + Ni)$ . Такую структуру можно интерпретировать как переслаивание габброидов разной степени меланократовости, в которых встречаются горизонты, обогащенные оливином.

Наиболее контрастно эта геохимическая структура проявлена на севере мульды (скв. 248 и 200). В ее южной части (скв. 68) разрез видоизменяется, сохраняя лишь основные черты своего строения. Проявляется это в том, что вверх по разрезу, начиная с пачки габброноритов - анортозитов двупироксеновой зоны, исчезает контрастность геохимической структуры, и можно лишь говорить о преобладании того или иного типа пород: габброиды осложняются ритмичными прослоями пироксенитов и меланократовых габброидов, а пироксениты, особенно в нижней части пачки, - меланократовыми габброидами. Несколько изменяется положение перидотитового прослоя. В краевых частях мульды перидотитовый прослой установлен непосредственно на границе пачек, в центральных частях он наблюдается несколько выше по разрезу - в низах пачки пироксенитов. По-видимому, отсутствие симметричного сокращения мощностей на южной оконечности мульды, а также сильные различия в стратиграфической высоте скважин 354 и 260, находящихся друг от друга в 500 м, позволяют вы-

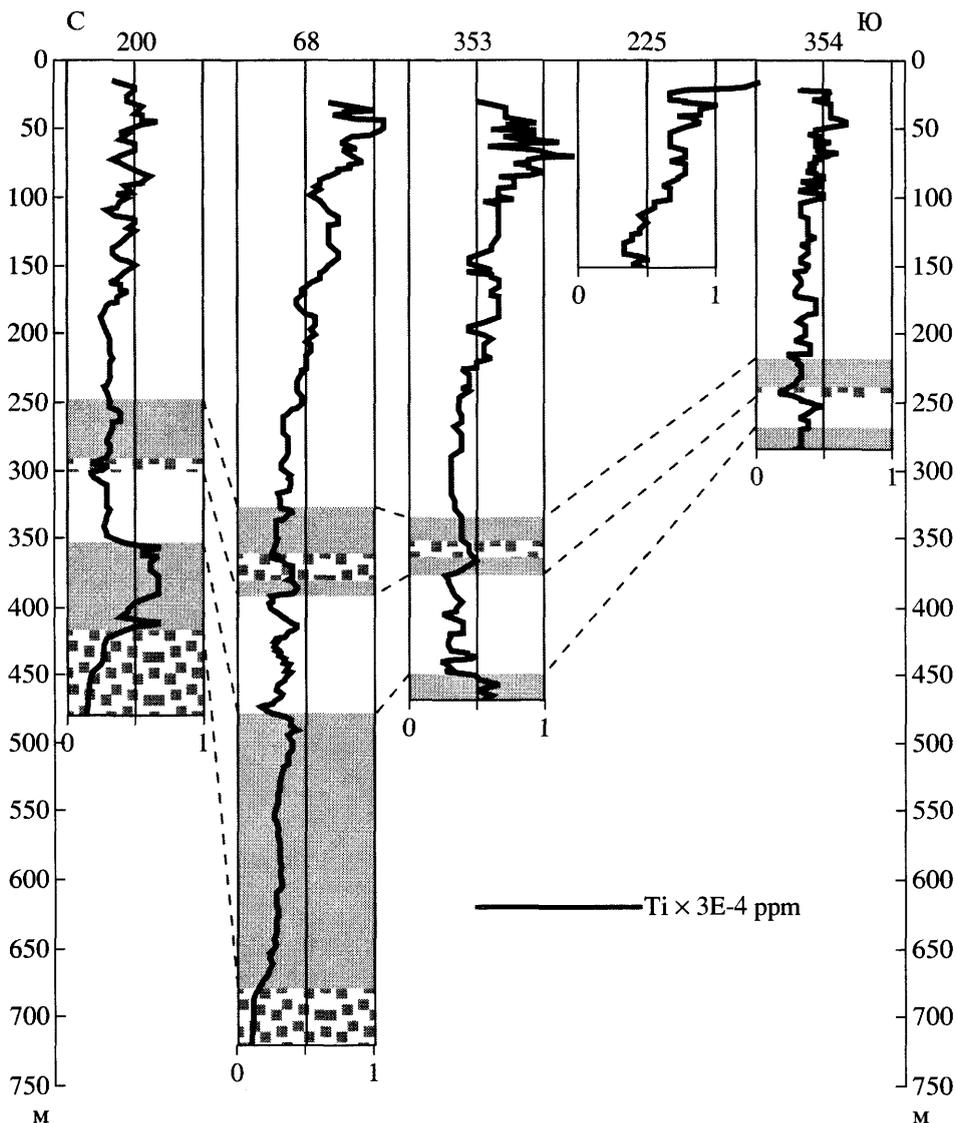


Рис. 7. Вариации титана в породах центральной части Аганозерского блока. Условные обозначения на рис. 5.

сказать предположение о существовании тектонического нарушения, срезающего южную часть тела габброидов.

Увеличение содержаний титана вверх по разрезу габброидных пород позволяет установить самые верхние горизонты расслоенной серии блока. Аномально высокие для пород блока концентрации титана наблюдаются в верхах скважин 68, 225 и 353 (рис. 7).

Данный профиль наглядно демонстрирует, что скважина 200 выпадает из общего ряда своими сокращенными мощностями по сравнению с соседними (скв. 248 и 68). Это можно объяснить только их различным положением относительно тальвега оврагоподобной поверхности, которую некогда образовывала кровля ультраосновной зоны. Скважины 248 и 68 расположены значительно

ближе к "тальвегу" мульды, а скважина 200 располагается на ее западном крыле. В силу этого логично предположить что, "тальвег" Аганозерской мульды имеет в плане дугообразную форму. Это предположение хорошо согласуется со структурой скв. 201, которая пробурена западнее скважины 200 и в деталях повторяет структуру последней. При этом она имеет еще более сокращенные мощности и практически выклинившуюся пачку лейкократовых габброидов мощностью около 15м.

**Геохимическая структура Шалозерско-Бураковской части массива.** В отличие от Аганозерского блока, степень изученности Шалозерско-Бураковской части массива значительно ниже. Это связано не только с меньшей плотностью расположения скважин, но и с особенностью пород и геометрией внутренней структуры этой части плутона. По направлению к центру Шалозер-

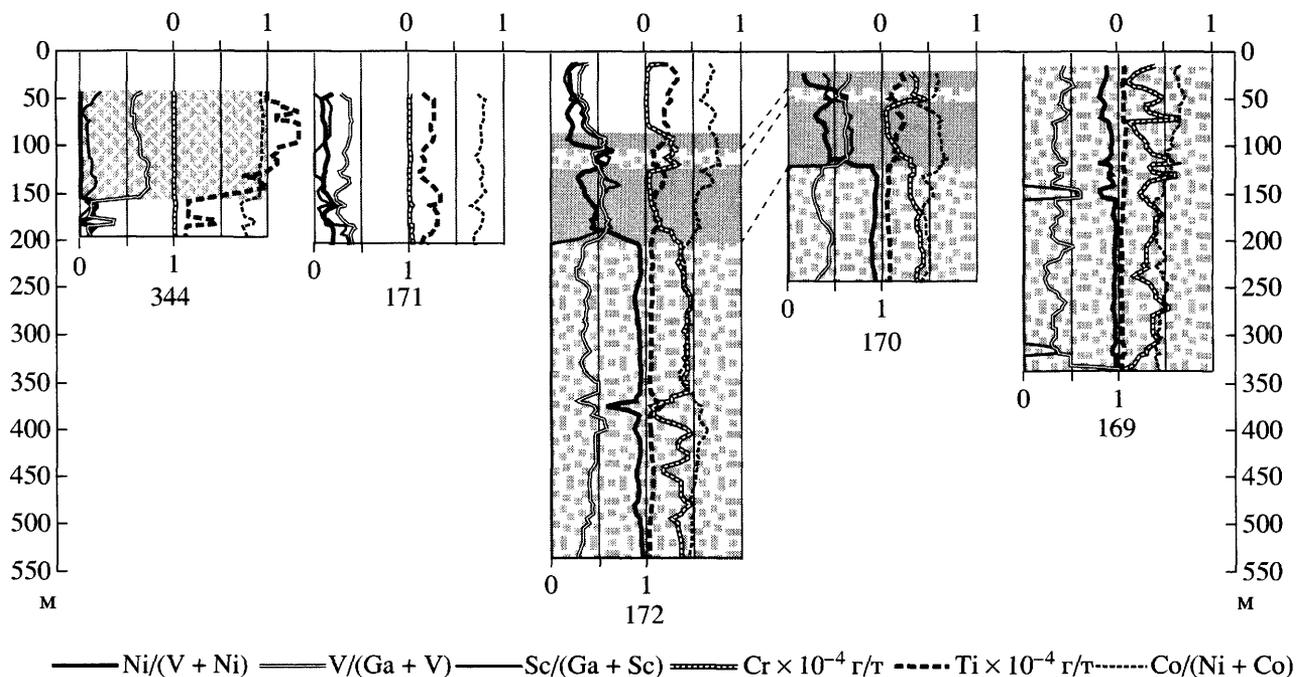


Рис. 8. Геохимический профиль, характеризующий восточную часть Шалозерского блока. Условные обозначения на рис. 5.

ско-Бураковской части происходит резкое увеличение мощностей габброидных пород, как за счет падения кровли ультрамафитов, так и за счет напластования более высоких горизонтов расслоенной серии, не уничтоженных эрозией. Кроме того, расслоенная серия Шалозерско-Бураковской части интрузива, по сравнению с породами Аганозерского блока, характеризуется значительно меньшей контрастностью. Совокупность этих факторов сильно затрудняет выделение синхронных горизонтов, а также порождает проблему возможного существования горизонтов расслоенной серии, не вскрытых скважинами, и оценки их мощности.

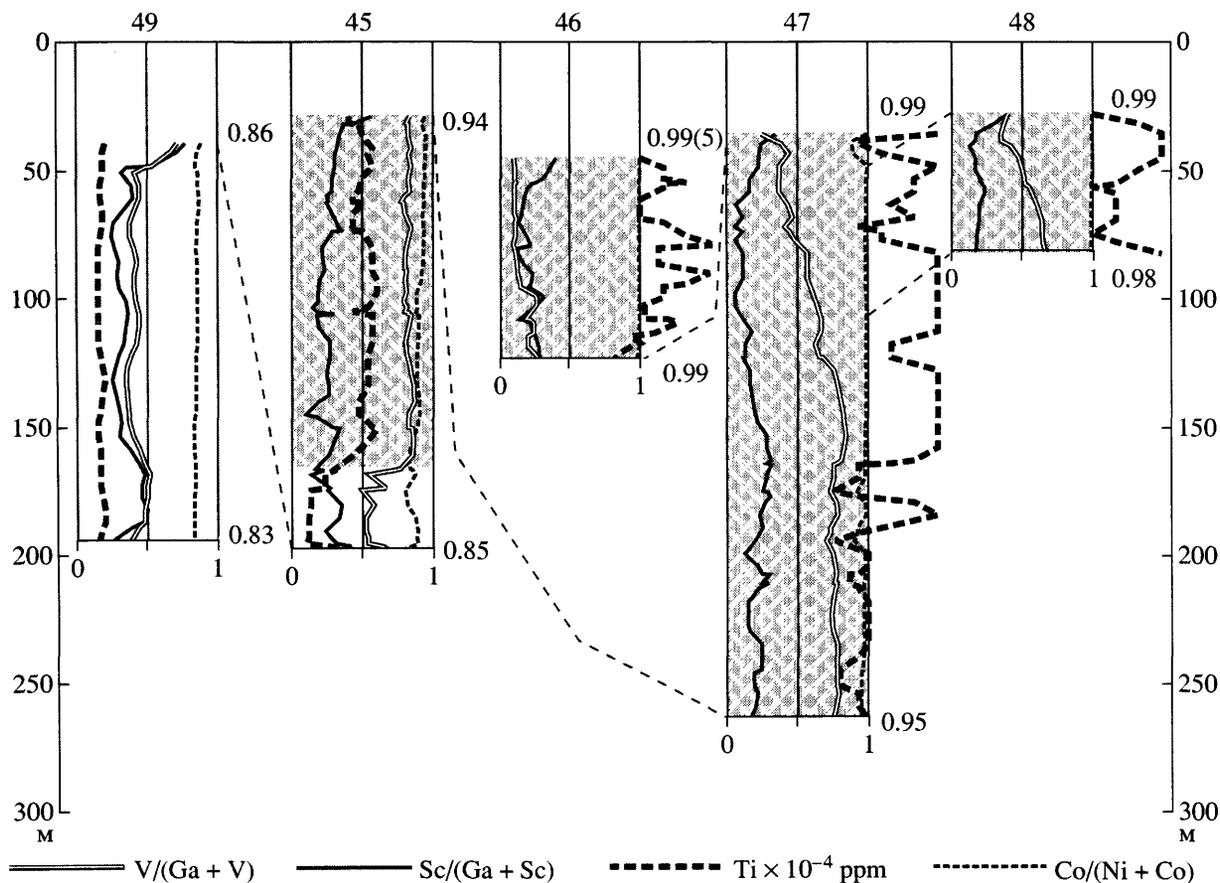
В кернах скважин, пробуренных на Шалозерском блоке массива, выделяется два типа разреза, что отражается в их нескольких различных геохимических структурах. Первый тип структуры встречен только в скважинах 174 и 175, расположенных на северо-восточном окончании блока в зоне его сочленения с Аганозерским. Наблюдаемая геохимическая структура скважины в деталях повторяет структуру краевых частей Аганозерской мульды.

Геохимическая структура второго типа, типичная для всего блока в целом, может быть охарактеризована профилем, скважины которого вскрывают все типы кумулатов, встреченные в пределах массива (рис. 8). Толща двупироксеновых кумулатов (скв. 170, 172) характеризуется более простой структурой: кроме преимущественно

пироксеновых пород установлен только перидотитовый прослой. Переход от двупироксен-плаггиоклазового к магнетит-двупироксен-плаггиоклазовому кумулятивному парагенезису наблюдается в скважине 344 и знаменуется резким увеличением параметра  $V/(Ga + V)$ . Исключительным свойством данного парагенезиса являются самые высокие содержания  $Ti$ .

Отличительной особенностью этого типа разреза от последовательности пород, представленной в скважинах 174 и 175, является отсутствие габброидной пачки пород, подстилающей горизонт перидотитов. В то же время идентичность геохимических структур скважин 174 и 175 со структурами габброидной мульды Аганозерского блока может свидетельствовать об их большей пространственной близости в первичном залегании по сравнению с породами Шалозерского блока. Объяснение этому факту можно дать исходя из предположения о существовании чешуйчатого надвига в зоне сочленения Аганозерского и Шалозерского блоков.

Геохимическая структура расслоенной серии, вскрытой скважинами на западной окраине Шалозерского блока, охарактеризована профилем, изображенным на рис. 9. Скважины, составляющие профиль, вскрывают породы двупироксен-плаггиоклазовых и магнетит-двупироксен-плаггиоклазовых кумулатов. Нижняя граница толщи магнетит-двупироксен-плаггиоклазовых кумулатов (скв. 45) маркируется резким увеличением



**Рис. 9.** Геохимический профиль, характеризующий западную часть Шалозерского блока. Условные обозначения на рис. 5; цифры у устья и забоя скважин отражают предельные значения тренда отношения  $Co/(Ni + Co)$ .

значений отношения  $V/(Ga + V)$  и концентраций титана. Корреляция скважин, вскрывающих этот кумулятивный парагенезис, проводилась по отношению  $Co/(Ni + Co)$ . Поскольку в пределах скважины в индивидуальных пробах величина этого отношения подвержена колебаниям, то при построении корреляционной схемы учитывались тренды изменения этой величины. Это отношение хорошо согласуется с распределением ванадия, которое характеризуется показателем  $V/(Ga + V)$ . Появление в разрезе расслоенной серии *Mt* как минерала-концентрактора ванадия приводит к скачкообразному увеличению его содержания в породе. По мере кристаллизации *Mt* происходит истощение ванадия из расплава и, как следствие, уменьшение его содержания в породах расслоенной серии на фоне примерно постоянных концентраций титана.

Для построения представительных профилей Бураковского блока плутона данных не достаточно. Поэтому геохимический анализ скважин проводился с целью поиска пород верхней приконтактной зоны, сэндвичевого горизонта или наиболее дифференцированных горизонтов расслоенной

серии. Но ни одна из пробуренных на теле Бураковского блока скважин не обнаружила геохимических структур, характерных для пород верхней приконтактной зоны. При полном разрезе зоны примерзания должна наблюдаться обратная петрографическая зональность, а в случае ее неполной сохранности - обратный тренд отношения  $Co/(Ni + Co)$ . Кроме того, этот показатель имеет более низкие значения по сравнению с породами, вскрытыми в керне скважины 46 на Шалозерском блоке. Эти наблюдения позволяют сделать вывод о том, что полный разрез расслоенной серии недоступен для исследования, а наиболее дифференцированные горизонты расслоенной серии вскрыты скважиной 46.

**Обобщенный разрез Бураковского-Аганозерского интрузива.**

Проведенные исследования позволили составить обобщенный разрез расслоенной серии интрузива. В соответствии с порядком смены кумулятивных парагенезисов в представленных выше профильных разрезах, расслоенная серия плутона разделяется на четыре зоны (снизу вверх):

Оливиновых кумулатов, Двупироксеновых кумулатов, Двупироксен-плагиоклазовых кумулатов и Магнетит-двупироксен-плагиоклазовых кумулатов. Оценить объемные соотношения пород с точностью, которая необходима для балансовых расчетов, на данном этапе исследования массива не представляется возможным. Приводимые ниже видимые мощности зон характеризуют примерные соотношения этих величин.

**Зона оливиновых кумулатов.** По геофизическим данным [3] мощность зоны в пределах Шалозерско-Бураковского блока оценена в 3 км. В Аганозерском блоке мощность зоны составляет 6 км, из которых верхние 900 м полностью серпентинизированы [3,7]. На основе пропорций кумулятивных и интеркумулятивных фаз в пределах этой зоны традиционно выделялись две подзоны: дунитов и пойкилитовых перидотитов. Подзона дунитов для непосредственного исследования доступна только на Аганозерском блоке. Она представлена довольно однородными оливиновыми адкумулятами, для которых характерны незначительные колебания пропорций кумулуca (95-98%) и интеркумуляуca (2-5%).

Подзона пойкилитовых перидотитов сложена породами с "рыхлым" кумулятивным каркасом: по данным петрографических наблюдений объем интеркумулятивного материала обычно составляет 10-20, а иногда достигает 40%. Видимая мощность подзоны колеблется от 360 до 600 м. В составе интеркумуляуca разных блоков установлены различия. В разрезе Аганозерского блока преобладают пойкилитовые верлиты, среди которых отмечены отдельные горизонты лерцолитов и гарцбургитов мощностью 2-10 м. В отдельных скважинах установлены не выдержанные по простиранию горизонты пироксенитов, дунитов и маломощные прослои хромитовых руд. В разрезе Шалозерского блока преобладают пойкилитовые лерцолиты и гарцбургиты, отсутствуют горизонты пироксенитов и хромитов. Примечательно, что в зоне сочленения Аганозерского и Шалозерского блоков (скв. 174—175) основную часть разреза составляют лерцолиты с отдельными горизонтами гарцбургитов, а на юге Шалозерского блока в разрезе преобладают гарцбургиты с маломощными прослоями верлитов, приуроченных к верхней части разреза подзоны. Это наблюдение еще раз демонстрирует промежуточный характер зоны сочленения относительно обоих блоков.

**Зона двупироксеновых кумулатов** - наиболее сложная по строению. Видимая мощность зоны варьирует от 100 до 350 м в пределах Аганозерского блока и от 60 до 180 м в пределах Шалозерского.

На Аганозерском блоке зона характеризуется значительно большей распространенностью клино-относительно ортопироксена. Двупироксеновые кумулаты характерны для верхних частей

разреза зоны, в то время как клинопироксениты преимущественно развиты в ее нижней части. Как было установлено [16, 32], переход от оливиновых кумулатов к двупироксеновым происходит через 5-10 метровый интервал, где наблюдается интенсивное замещение перидотитовых кумулатов клинопироксенитовым агрегатом образованием пятнистых пород с реликтовыми участками перидотитов. Примечательно, что максимальное развитие клинопироксенитов приурочено к центральным частям мульды, а вебстеритов - к ее периферии [31]. Кроме того, в центральных частях блока в базальных горизонтах зоны установлены нигде более не встречающиеся, практически мономинеральные клинопироксениты с характерными гранобластовыми структурами с зубчатыми симплектитовыми прорастаниями. Для клинопироксенитов установлено широкое развитие кварц-карбонатных включений в кристаллах как первой, так и второй структурных групп [22]. Зона пироксенитов, вскрытая на Шалозерско-Бураковском блоке, сложена преимущественно вебстеритами; от Аганозерского блока она отличается более широким развитием ортопироксена и отсутствием признаков субсолидусного преобразования пород.

В обеих частях массива зона осложнена мощным прослоем перидотитов (оливин-ортопироксен-хромитовые кумулаты), видимая мощность которого колеблется от 5-8 м в Аганозерском блоке (скв. 68, 248) до 40 м в южной части Шалозерского (скв. 333, 334). Асимметричное изменение мощности этой пачки (не совпадающее с закономерностями, установленными для остальных пород расслоенной серии), непостоянное стратиграфическое положение в пределах зоны, "возврат" в кристаллизационной последовательности и накопление столь мощной пачки более примитивной кумулятивной ассоциации можно объяснить дополнительным внедрением новой порции менее фракционированной магмы. Очевидно, что дополнительные внедрения могут проявляться как события случайные, поэтому практически одинаковое стратиграфическое положение данной пачки в разрезах обоих блоков является аргументом их единовременного образования. Это позволяет рассматривать pluton как единое геологическое тело.

Кроме того, в пределах Аганозерского блока зона двупироксеновых кумулатов осложнена пачкой лейкогабброидов и анортозитов. Стратиграфически она расположена ниже прослоя перидотитов. Мощность пачки сильно варьирует по простиранию: от 60 м в северной части мульды до 90 м в ее центральных частях. На севере мульды образной структуры (скв. 16 и 200) пачка представлена габбро-норитами с прослоем вебстеритов. В центральных частях мульды (скв. 68) количество маломощных прослоев вебстеритов, клинопироксенитов и перидотитов возрастает и

пачка превращается в контрастно расслоенную толщу. Разрез пачки венчается горизонтом анортозитов мощностью несколько метров, который хорошо прослеживается на протяжении всей структуры. Характерно, что в центральных частях блока наблюдаются не только максимальная мощность пачки лейкогабброидов, но и аналогичные прослои габбро-норитов и анортозитов в верхах зоны пироксенитов, которые также выклиниваются к периферии мульды. Габброидные породы в верхней пачке пироксенитов составляют [31] не более 5-10% от мощности разреза.

Отсутствие подобной стратиграфической единицы во вскрытых породах Шалозерско-Бураковской части плутона, приуроченность ее максимальных мощностей к центральным частям Аганозерского блока и их выклинивание на краях мульды указывает на весьма ограниченную распространенность этих пород и приуроченность к горизонтам с максимальной субсолидусной переработкой.

**Зона двупироксен-плагноклазовых кумулатов** сложена преимущественно габбро-норитами и габбро-норитами с инвертированным пижонитом. Анортозиты, габбро, нориты и плагноклазодержащие вебстериты находятся в резко подчиненном количестве, образуя отдельные горизонты и маломощные пачки. В пределах Аганозерского блока в результате эрозии сохранилась только нижняя часть разреза зоны видимой мощностью 300 м. На Шалозерском блоке исследованию доступен полный разрез пород зоны, видимая мощность которого составляет не менее 750 м.

Характерной особенностью этой зоны является смена ортопироксена на инвертированный пижонит. В предыдущих схемах строения массива [11, 12, 22] этот переход использовался в качестве стратиграфической границы. Мы обращаем внимание на стратиграфическую невидержимность этого перехода. Так, в разрезе Аганозерского блока, который из-за воронкообразной формы характеризуется увеличенными мощностями, появление пижонита фиксируется на высоте 200 м над нижней границей зоны. В то же время в скважине 333 Шалозерского блока вскрыт 385-метровый разрез пород зоны, в которых пижонит не наблюдается.

Пижонитовые габбро-нориты Аганозерского блока имеют видимую мощность около 60 м. Они представляют переслаивание быстро выклинивающихся прослоев и линз вебстеритов, ортопироксенитов, норитов, анортозитов, габбро-норитов и габбро-норитов с инвертированным пижонитом при резком преобладании последних. Пачка несет на себе следы субсолидусных процессов. Эти породы обладают пятнистым или полосчатым обликом, в них установлено широкое развитие такситовых и пегматоидных разностей. По сравнению с

подстилающими габбро-норитами, эти породы характеризуются значительно более широким развитием вторичных изменений: скаполитизации, хлоритизации, пренитизации, карбонатизации и оталькования.

Для толщи пижонитовых габбро-норитов Шалозерско-Бураковского блока характерна выдержанная по простиранию расслоенность: 20-30-метровые слои пижонитовых габбро-норитов чередуются с 1-4-метровыми горизонтами других пород, среди которых преобладают не содержащие инвертированного пижонита габбро-нориты, реже анортозиты, вебстериты, пижонитовые вебстериты [31]. Горизонты габбро-норитов часто осложнены прослоями норитов, анортозитов, ферро-габбро-норитов и такситовыми породами. Столь сложные взаимоотношения габброидов и их пижонитовых разновидностей, вероятно, сформировались в результате субсолидусных изменений состава низкокальциевого пироксена, которые при дальнейшем охлаждении приводили к образованию той или иной его полиморфной модификации.

**Зона двупироксен-плагноклаз-магнетитовых кумулатов** сложена в основном титано-магнетитовыми габбро-норитами. Расслоенность пород зоны обусловлена ритмичным чередованием лейко- и мезократовых разновидностей. Прослои меланократовых разностей, вебстеритов, норитов и анортозитов относительно общего объема пород зоны составляют незначительную часть - в сумме не более 5-6% разреза. В прослоях мезократовых пород часто наблюдается микроритмичность, обусловленная закономерным изменением содержания кумулятивного титаномагнетита. В целом, вверх по разрезу зоны отмечается увеличение доли плагноклаза и титаномагнетита и пропорциональное уменьшение доли пироксенов. Видимая мощность зоны составляет 450 м.

Таким образом, порядок смены зон расслоенной серии, отвечающий порядку типоморфных кумулятивных парагенезисов:  $OI$  — высоко- $Ca Px$  + низко- $Ca Px$  — высоко- $Ca Px$  + низко- $Ca Px$  + +  $Pl$  — высоко- $Ca Px$  + низко- $Ca Px$  +  $Pl$  +  $Mt$ , можно в первом приближении принять за последовательность кристаллизации исходной магмы Бураковско-Аганозерского плутона.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Полученные результаты стратификации и корреляции скважин формально близки приведенным в предшествующей публикации [22]. Однако заметим, что факторы, положенные предшественниками в основу своей классификации, не могут быть корректно проинтерпретированы с геохимической точки зрения. Показательно, что большие факторные нагрузки (0.7-0.8) име-

ют такие петрологически невыразительные компоненты, как п.п.п и слабо некогерентный Мп. Отсутствие четкой интерпретации исследуемого аналитического материала предопределило многие ошибочные частные выводы этих авторов. Так, например, разрез краевой группы, вскрытый скв. 187, отнесен ими к последовательности пород расслоенной серии.

Предлагаемая в настоящей работе простая и эффективная методика имеет ясную геохимическую интерпретацию, в рамках которой генетическое толкование может быть дано каждой единичной пробе. Кроме того, необходимо отметить, что предложенный алгоритм петрохимической типизации выгодно отличается от применяемых в подобных случаях статистических процедур, основанных на расчете среднего. Для их корректного использования исследуемая выборка должна быть выпуклой, в противном случае в процессе анализа возможна генерация средних значений, которые не принадлежат анализируемой совокупности.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Разработана простая и эффективная методика фазовой интерпретации петрохимической и геохимической информации, позволяющая использовать анализы, не сопровождающиеся шлифами.

2. Имеющиеся петрографические данные позволяют утверждать, что все разнообразие кумулятивных пород определяется одним из четырех типоморфных наборов минералов: *Ol*, высоко-Са *Px* + низко-Са *Px*, высоко-Са *Px* + низко-Са *Px* + *Pl*, высоко-Са *Px* + низко-Са *Px* + *Pl* + *Mt*.

3. Предложена новая схема строения расслоенной серии Бураковско-Аганозерского плутона. Показано, что в разрезе расслоенной серии интрузива наблюдается последовательная смена зон: Оливиновых, Двупироксеновых, Двупироксен-плагиоклазовых и Магнетит-двупироксен-плагиоклазовых кумулятов. Она отвечает порядку смены типоморфных кумулятивных парагенезисов, который, в первом приближении, можно принять за последовательность кристаллизации исходной магмы.

4. Выявлено, что полный разрез расслоенной серии интрузива недоступен для исследования в существующих ядрах скважин.

5. Продемонстрировано, что в разных частях магматической камеры одновременно формируются породы с разными геохимическими характеристиками, обусловленными разной пористостью кумулятивного каркаса. Это делает некорректным прямое сопоставление петро-, геохимических характеристик пород Аганозерской и Бураковско-Шалозерской частей массива.

6. Установлено, что пачка перидотитов, осложняющая разрез зоны двупироксеновых кумулятов, является морфологически чужеродной общей рас-

слоенности плутона и может интерпретироваться как результат дополнительного внедрения новой порции магмы. Приуроченность этой пачки в обоих блоках к очень узкому интервалу разреза расслоенной серии, в силу случайности процесса дополнительного внедрения, служит весомым аргументом в пользу принадлежности блоков единой магматической камере.

7. Обнаружена пространственная связь пачки лейкогабброидов и анортозитов зоны Двупироксеновых кумулятов Аганозерского блока с породами, подвергшимися максимальным субсолидусным изменениям, что позволяет сделать предположение об их возможной генетической связи.

*Авторы признательны руководству Карельской геологической экспедиции и ее Бураковской партии за предоставленную возможность воспользоваться архивными материалами. Мы выражаем глубокую благодарность д.г.-м.н. А.А. Арискину (ГЕОХИ РАН) и д.г.-м.н. А.А. Ярошевскому (МГУ) за ценные советы при подготовке рукописи.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта 6-го конкурса-экспертизы молодых ученых РАН 1999 г. (грант № 300), грантов РФФИ № 99-05-64875, 99-05-65118 и 01-05-06271, а также гранта № 015.09.02.016 программы "Университеты России".*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликова В.В. Волоцкая свита - стратотип нижнего архея Балтийского щита. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1993. 256 с.
2. Поликарпов В.К. Вертикальная петрофизическая зональность Бураковского массива (восточное Занонежье) и ее проявление в физических полях // В кн. Петрофизика древних образований. Апатиты, 1986. С. 45-47.
3. Соболев П.О. Глубинное строение Бураковского массива // В кн. Геология Северо-Запада Российской Федерации / Под ред. Проскуракова В.В. и Гаскельберга В.Г. СПб.: Северо-Западный геологический центр, 1993. С. 193-207.
4. Гарбар Д.И., Сахновская Т.П., Чечель Э.К. Геологическое строение и рудоносность Бураковско-Аганозерского массива (Восточное Прионежье) // Изв. АН СССР, сер. геол., 1977. № 8. С. 100-112 (Intern. Geol. Rev., 1978. V. 20. № 6. P. 637-647.)
5. Лавров М.М., Трофимов Н.Н. Новая хромитовая формация Карелии // В кн. Результаты полевых исследований 1984 года. Оперативно-информационные материалы. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, Институт геологии, 1985. С. 24-27.
6. Лавров М.М., Трофимов Н.Н. Стратиформное хромитовое оруденение в расслоенной интрузии докембрия Карелии // ДАН СССР. 1986. Т. 289. № 2. С. 449-451.
7. Горошко А.Ф. Новый геолого-промышленный тип месторождений комплексного никель-магнетитового сырья в ультрамафитах Карелии // В кн.

- Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 1 / Под ред. Голубева А.И., Рыбакова С.И. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. С. 24-35.
8. Ганин В.А., Гриневич Н.Г., Логинов В.Н. Петрология и платиноносность Бураковско-Аганозерской интрузии (восточное Заонежье) // В кн. Платина России, т. 2, кн. 2. М.: Геоинформмарк, 1995. С. 19-23.
  9. Металлогения Карелии / Под ред. Рыбакова С.И., Голубева А.И. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. 340 с.
  10. Пчелинцева Н.Ф., Николаев Г.С., Коптев-Дворников Е.В., Гриневич Н.Г. Поведение Pt, Pd, Au и Cu в процессе кристаллизации Бураковского интрузива (Южная Карелия) // Доклады РАН, 2000. Т. 375. № 4. С. 521-524.
  11. Лавров ММ. Оливины и пироксены Бураковской расслоенной интрузии // В кн. Минералогия магматических и метаморфических пород докембрия Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, Институт геологии, 1994. С. 6-41.
  12. Коптев-Дворников Е.В., Николаев Г.С., Ганин В.А. и др. Вертикальное строение Аганозерско-Бураковского рудоносного расслоенного интрузива (юго-восток Балтийского щита) // В кн. VII Международный платиновый симпозиум, тез. докл., Москва, Россия, 1-4 августа 1994. С. 48.
  13. Николаев Г.С., Коптев-Дворников Е.В., Ганин В.А., Гриневич Н.Г. Пространственная структура Бураковско-Аганозерского расслоенного массива и распределение петрогенных элементов в его разрезе // Отеч. геология. 1995. № 10. С. 56-64.
  14. Николаев Г.С., Коптев-Дворников Е.В., Ганин В.А. и др. Вертикальное строение Бураковско-Аганозерского расслоенного массива и распределение петрогенных элементов в его разрезе // Доклады РАН. 1996. Т. 347. № 6. С. 799-801.
  15. Уэйджер Л., Браун Г. Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 1970. 551 с.
  16. Sharkov E.V., Bogatikov O.A., Grokhovskaya T.L. et al. Petrology and Ni-Cu-Cr-PGE mineralization of the largest mafic pluton in Europe: The early Proterozoic Burakovsky layered intrusion, Karelia, Russia // Intern. Geol. Rev., 1995. V. 37. P. 509-525.
  17. Snyder G.A., Higgins S.J., Taylor L.A. et al. Archean enriched mantle beneath the Baltic Shield: rare-earth-element evidence from the Burakovsky layered intrusion, southern Karelia, Russia // Intern. Geol. Rev., 1996. V. 38. P. 389-404.
  18. Higgins S.J., Snyder G.A., Mitchell J.N. et al. Petrology of the early proterozoic Burakovsky layered intrusion, southern Karelia, Russia: mineral and whole-rock major-element chemistry // Can. J. Earth. Sci., 1997. V. 34. P. 390-406.
  19. Чистяков А.В., Суханов М.К., Богатиков О.А. и др. Особенности распределения редких и редкоземельных элементов в Бураковском расслоенном интрузиве (Южная Карелия, Россия) // Докл. РАН. 1997. Т. 356. № 3. С. 376-381.
  20. Корнеев С.И., Семенов В.С., Берковский А.Н. и др. Особенности геологического строения Бураковско-Аганозерской расслоенной интрузии (Ю. Карелия) // В кн. Межд. конференция "Закономерности эволюции земной коры" к 60-летию НИИЗК СПбГУ. Тезисы докл., том 2. СПб., 1996. С. 105.
  21. Semenov V.S., Berkovsky A.N., Korneyev S.I. et al. Burakovsky layered complex (Karelia) - multiple intrusion // Abstracts of 30th Int. Geol. Congr., Beijing, China, 8-14 Aug 1996. V. 2. P. 423.
  22. Берковский А.М., Семенов В.С., Корнеев С.И. и др. Строение Бураковско-Аганозерского расслоенного комплекса, петрологические выводы // Петрология. 2000. Т. 8. № 6. С. 650-672.
  23. Amelin Yu.V., Semenov V.S. Nd and Sr isotope geochemistry of mafic layered intrusions in the eastern Baltic Shield: Implications for the sources and contamination of Paleoproterozoic continental mafic magmas // Contribs Mineral. and Petrol. 1996. V. 124. P. 255-272.
  24. Чистяков А.В., Богатиков О.А., Гроховская Т.Л. и др. Бураковский расслоенный плутон (Южная Карелия) как результат пространственного совмещения двух интрузивных тел: петрологические и изотопно-геохимические данные // Доклады РАН. 2000. Т. 372. № 2. С. 228-235.
  25. Wright P.M., Steinberg E.P., Glendenin L.E. Half-life of samarium-147 // Phys. Rev., 1961. V. 123. № 1. P. 205-208.
  26. Donhoffer D. Bestimmung der Halbwertszeiten der in der Natur vorkommenden radioaktiven Nuklide Sm<sup>147</sup> und -Lu<sup>176</sup> mittels flüssiger Szintillatoren // Nucl. Phys. 1964. V. 50. № 3. P. 489-496.
  27. Valli K., Aaltonen J., Graeffe G. et al. Half-life of Sm-147; of ionization chamber and liquid scintillation results // Ann. Acad. Sci. Fenn., 1965. Ser. A6., Issue. 177. P. 21.
  28. Gupta M.C., MacFarlane R.D. The natural alpha radioactivity of samarium // J. inorg. nucl. Chem., 1970. V. 32. № 11. P. 3425-3432.
  29. Lugmair G.W., Marti K. Lunar initial <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd: Differential evolution of the lunar crust and mantle // Earth Planet. Sci. Letters, 1978. V. 39. P. 349-357.
  30. Irvine T.N. Terminology for layered intrusions // J. Petrology, 1982. V. 23. № 2. P. 127-162.
  31. Ганин В.А., Логинов В.Н., Гриневич Н.Г. Геологическое строение и полезные ископаемые Бураковско-Аганозерского массива и его обрамления. Отчет о результатах глубинного картирования масштаба 1 : 50000 за 1990-1995 гг. Петрозаводск: Карельская геологическая экспедиция, 1995.
  32. Шарков Е.В., Богатиков О.А., Пчелинцева Н.Ф. и др. Перспективы платиноносности раннепротерозойского Бураковского расслоенного интрузива в южной Карелии // В кн. Платина России, т. 2, кн. 2. М.: Геоинформмарк, 1995. С. 10-19.
  33. Соболев П.О. Ориентировка игольчатых микровключений железорудных минералов в плагиоклазе (на примере Бураковского массива) // Зап. Всес. минерал. общ-ва, ч. СХІХ, 1990. Вып. 1. С. 36-50.
  34. Morse S.A. Kiglapait geochemistry II: Petrography // J. Petrology, 1979. V. 20. № 3. P. 591-624.
  35. Козарко Л.Н. Отношение Ni/Co - индикатор мантийного происхождения магм // Геохимия. 1973. № 10. С. 1441-1446.