

**ГЕНЕЗИС ЖИЛЬНЫХ ПЛАГИОКЛАЗИТОВ ЧЕРНОИСТОЧИНСКОГО АРЕАЛА
В ТАГИЛЬСКОМ МАССИВЕ (ПЛАТИНОНОСНЫЙ ПОЯС УРАЛА):
ДЕСИЛИКАЦИЯ ПЛАГИОГРАНИТНОГО ПРОТОЛИТА В ГАББРО**

А.А. Ефимов

*Институт геологии и геохимии им.акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН
620151, Екатеринбург, Почтовый пер., 7*

E-mail: efimov@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 31 января 2003 г.

Рассмотрен петрогенезис известной в Платиноносном поясе Урала плагиоклазит-плагиогранитной жильной серии (ПП-серии). Показано, что в вопросе о генезисе плагиоклазитов имеется фундаментальное противоречие между полевыми наблюдениями и петрологическими ограничениями: с одной стороны, наблюдается отчетливая картина магматических внедрений в твердое габбро или клинопироксенит; с другой – существование плагиоклазовой магмы запрещено законами плавления и кристаллизации силикатных систем и экспериментальными данными. В ареалах типа Черноисточинского ПП-серия образует жилы выполнения в роговообманковом габбро. Матрица и жилы химически дискретны, однако сходство состава минеральных фаз, структур и близкий к линейному закон распределения следовых элементов в жилах и матрице говорит том, что они изофациальны и приближены к состоянию химического равновесия, т.е. составляли единую термодинамическую систему, в которой химические потенциалы компонентов были выровнены. Современные эксперименты по плавлению роговообманковых базитов накладывают категорический запрет на возможность существования бескварцевых и бедных кварцем членов ПП-серии в виде магматической жидкости. Генезис ПП-серии непротиворечиво объясняется десиликацией сети магматических плагиогранитных жил, заполнивших разрывы в твердой и горячей габбровой матрице во время метаморфического события амфиболитовой ступени, при избытке водного флюида, способствовавшего химическому обмену между матрицей и жилами; последние сохранили при этом первичную магматическую морфологию. Существование непрерывного химического ряда плагиоклазит-плагиогранит отражает разную степень десиликации исходного плагиогранита.

Ключевые слова: *плагиоклазиты, плагиограниты, габбро, десиликация, Платиноносный пояс Урала.*

**THE GENESIS OF VEIN PLAGIOCLASITES OF THE CHERNOISTOCHINSK AREAL
IN THE TAGIL MASSIF (PLATINUM BELT OF THE URALS): DESILICATION OF
PLAGIOGRANITE PROTOLITH IN GABBRO**

A.A. Efimov

Institute of Geology and Geochemistry, the Uralian Branch of RAS

The origin of the plagioclase-plagiogranite vein series (PP-series) known in the Uralian Platinum Belt is considered. It is shown that a fundamental contradiction between field supervision and petrological restrictions is hidden in the question on genesis of plagioclase: on the one hand, there is a clear picture of magmatic intrusions in solid gabbro or pyroxenite; on the other, existence of plagioclase magmas is forbidden by laws of melting and crystallization of silicate systems and by experimental data. In areas such as Chertnoistochinsk the PP-series forms filling veins in hornblende gabbro. Matrix and veins are chemically discrete, however similarity of structure and mineral phase compositions and distribution of trace elements between veins and matrix which is close to linear law evidence that they are isofacial and approached to chemical equilibrium, i.e. compose a single thermodynamic system in which chemical potentials of components are equalized. Modern experiments on melting of hornblende basic rocks impose a categorical

interdiction on a possibility of existence of quartz-free and quartz-poor members of the PP-series as a magmatic liquid. Genesis of the PP-series is incontradictory explained by desilication of a plagiogranite magmatic vein network, filling gaps in solid and hot gabbro matrix during a metamorphic event of amphibolite facies, at surplus of water fluid promoting a chemical exchange between matrix and veins; the latter have preserved primary magmatic morphology. Existence of the continuous chemical series plagioclase-plagiogranite reflects a different degree of desilication of the primary plagiogranite.

Key words: *plagioclases, plagiogranites, gabbro, desilication, Uralian platinum belt.*

Введение

Л. Дюпарк и С. Ершов [Duparc, Jerchoff, 1902] описали в клинопироксенитах Косьювинского Камня «плагиаплиты» – ультралейкократовые жильные породы, содержащие обломки пироксенита с реакционными роговообманковыми каймами. Согласно первоописанию и химическим анализам, приведенным как эталонные уже у Г. Розенбуша [1934], эти породы существенно, а иногда практически на 100 %, сложены плагиоклазом от олигоклаза до основного андезина и обычно содержат примесь роговой обманки. Под «массивными плагиаплитами», в которых «кварц обилен... до равных с полевым шпатом количеств» [Duparc, Tikonowitch, 1920, с. 156], понимались плагииграниты, слагающие там же интрузивные тела, жилы и эруптивные брекчии [Ефимов, Ефимова, 1967а, с. 264]. Таким образом, уже 100 лет тому назад фактически была выделена жильная серия от плагиигранита до плагиоклазовой породы. Бескварцевые разности серии были описаны во многих пунктах Платиноносного пояса Урала под названиями аплитовидных пород, лейкодиоритов, диорит-аплитов, сиенит-диоритовых аплитов, плагиоклазитов, олигоклазитов, андезинитов [Высоцкий, 1913; Заварицкий, 1928; Андреева, 1959; Решитько, 1962; Борисенко, 1966; Ефимов, Ефимова, 1967а; Фоминых и др., 1987 и др.]. Однако их петрогенетическая сущность оставалась достаточно неясной. Большинство авторов связывало «плагиаплиты» в довольно общей форме с гранитоидным магматизмом.

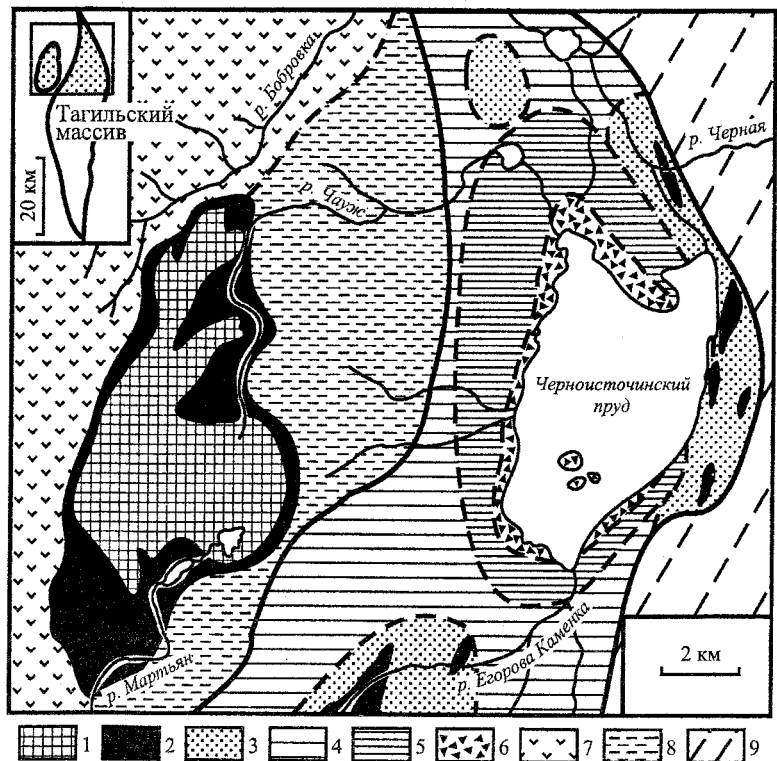
Г.Б. Ферштатер и его соавторы, не ссылаясь на предшественников, описали эту жильную серию под названием «анортозит-плагиигранитной формации», или «АП-серии», и квалифицировали ее как продукт анатексиса роговообманкового габбро в зоне палеосубдукции

[Ферштатер, 1983, 1992; Ферштатер и др., 1980, 1984, 1995, 1996, 1998 и др.]. По их мнению, это новый случай анатексиса, отличающийся от всех известных тем, что «продуктом анатексиса вследствие высокой степени плавления является не гранитоидный, а существенно плагиоклазовый мобилизат, не содержащий кварца» [Ферштатер и др., 1998, с. 768]. Можно сожалеть о возникшей при этом терминологической путанице: к поздним жилам, секущим пироксениты и габбро и ассоциирующим с плагиигранитами, применен термин «анортозит», которым принято обозначать сингенетичные плагиоклазовые сегрегации в габбро. Принимая во внимание, что термин Л. Дюпарка «плагиаплит» применительно к жильным плагиоклазовым породам не очень удачен, поскольку вызывает ассоциации с термином «плагии(гранит)аплит», а традиционный термин «анортозит» в данном случае вообще неприемлем, автор обозначает эту структурно-вещественную единицу Платиноносного пояса как плагиоклазит-плагиигранитную серию, или ПП-серию.

В вопросе о природе плагиоклазитов скрыто фундаментальное противоречие между полевыми наблюдениями и петрологическими ограничениями, которое, по-видимому, осознавалось частью исследователей достаточно давно, но не было отчетливо сформулировано. А именно: с одной стороны, имеется геологически однозначная картина интрузивных жильных внедрений в твердой пироксенитовой или габбровой матрице, не отличающаяся от таковой, свойственной магматическим (плагиигранитным) жилам, т.е. картина внедрения, казалось бы, магматической жидкости. Полевые наблюдения говорят о выполнении пространства жильной породой; нет признаков образования жильной сети метасоматическим или иным путем. Но, с другой стороны, существование плагиоклазовой жидкости, как продукта

Рис. 1. Схема геологического строения северного окончания Тагильского массива (по данным автора и В.И. Маегова, с использованием карты Н.К. Высоцкого [1913]).

1 – платиноносные дуниты; 2 – клинопироксениты и верлиты; 3 – оливковые габбро, частью зеленокаменные; 4 – зеленокаменные диафториты по габбро («соссюритовые габбро»); 5 – клинопироксен-роговообманковые и роговообманковые габбро; 6 – Черноисточинский ареал плагиоклазит-плагиогранитной серии (зона брекчий и жил в роговообманковых габбро); 7 – зеленые сланцы ордовика (?); 8 – метавулканы зоны Платиноносного пояса (амфиболиты и «кытлымиты» – диафториты по дупироксеновым гранулитам); 9 – кварцевые диориты.



селективного плавления, запрещено законами плавления и кристаллизации силикатных систем: «Не существует жидких магм, состав которых соответствовал бы составу какого бы то ни было плагиоклаза» [Боуэн, 1934, с. 172]. Причина – в том, что в любой системе с участием плагиоклаза температура плавления последнего всегда выше, чем температура начала плавления системы. Поэтому любая попытка генетической интерпретации бескварцевых плагиоклазовых пород должна принимать во внимание эти ограничения. В свете этого особое значение приобретают данные современных экспериментов. Вопрос, таким образом, затрагивает проблему существования плагиоклазовых жидкостей вообще.

Геология

Все известные ареалы ПП-серии Платиноносного пояса, в том числе и Черноисточинский, всегда находятся внутри массивов, т.е. габбро-гипербазитовых тел с более или менее отчетливыми геологическими границами, не выходя за их внешние контуры и не обнаруживая никакой связи с окружающими вулканитами.

Принципиально важно то, что ПП-серия на всем протяжении Пояса никогда не образует крупных монокристаллических тел: это всегда или сеть жил (жильный штокверк), пронизывающих клинопироксениты (Кытлымский, Качканарский массивы) или, как в данном случае, роговообманковые габбро, или зоны брекчий, в которых фрагменты тех же пород сцементированы жильным материалом. Документированная мощность плагиоклазитовых жил в пироксенитах Качканара достигает 20 м [Фоминых и др., 1987; Ефимов, Потапова, 2002], в Черноисточинском ареале преобладают жилы мощностью в сантиметры или доли метра. В то же время плагиограниты, входящие в ПП-серию, слагают не только жильные штокверки или зоны эруптивных брекчий, но и монокристаллические интрузивные тела, выходы которых измеряются квадратными километрами [Ефимов, Ефимова, 1967].

Черноисточинский ареал представляет собой не выходящее за контур северного окончания Тагильского массива поле брекчий и жил ПП-серии внутри более обширного поля роговообманковых и клинопироксен-роговообманковых габбро (рис. 1). Брекчии слагают прерывистую кольцевую зону с наибольшими размера-

ми около 9×5 км, шириной обычно до нескольких десятков метров, повторяющую очертания Черноисточинского пруда и имеющую нерезкие внешние ограничения. Преобладают береговые развалы местных глыб; небольшие коренные выходы сосредоточены главным образом в северном, более широком сегменте зоны. Те же брекчии выходят на островах, почему можно предполагать, что ими же сложено и дно пруда. Вся эта площадь заслуживает названия Черноисточинской зоны (или ареала) развития ПП-серии, однако нет признаков того, что здесь имеется единое плагиоклазитовое тело. Наблюдающуюся здесь небольшую отрицательную гравитационную аномалию можно связывать либо с большой вертикальной мощностью брекчий, либо с не выходящей на поверхность плагиогранитной интрузией (последнее достаточно вероятно: в Кытлымском массиве ареал ПП-серии обрамляет выход плагиогранитной интрузии [Ефимов, Ефимова, 1967]).

Важно, что внутри ареала все породы можно однозначно разделить всего на две фундаментальных геологических и вещественных категории: (1) целики или фрагменты (блоки, обломки, ксенолиты) роговообманково-плагиоклазовых базитов довольно разнообразного облика, объединяемых ниже собирательным названием «габбро», и (2) жильный материал (ПП-серия), секущий поле габбро или цементирующий их фрагменты в брекчиях. Признаков обратных соотношений нет. Обычные для Платиноносного пояса гипербазитовые тела или какие-то экзотические блоки здесь отсутствуют. Все базитовые фрагменты имеют один источник – поле роговообманковых габбро в пределах и за пределами ареала.

ПП-серия образует жилы, выполняющие сеть разрывов в роговообманковом габбро, по видимому, связанную с общим для всего Платиноносного пояса эпизодом тектонического растяжения [Ефимов, 1999], как правило, без следов пластической деформации и пластического течения. Контакты жил обычно достаточно резки, однако жилы механически неотделимы от вмещающей породы и ее фрагментов (при ударе породы контрастного состава не разделяются по контакту), что служит уже некоторым намеком на то, что имел место некий процесс, объединивший жилы и матрицу в монолитную массу. По нашим наблюдениям, жильный штотверк в первом приближении однофазен. Во всяком случае, пересечений плагиогра-

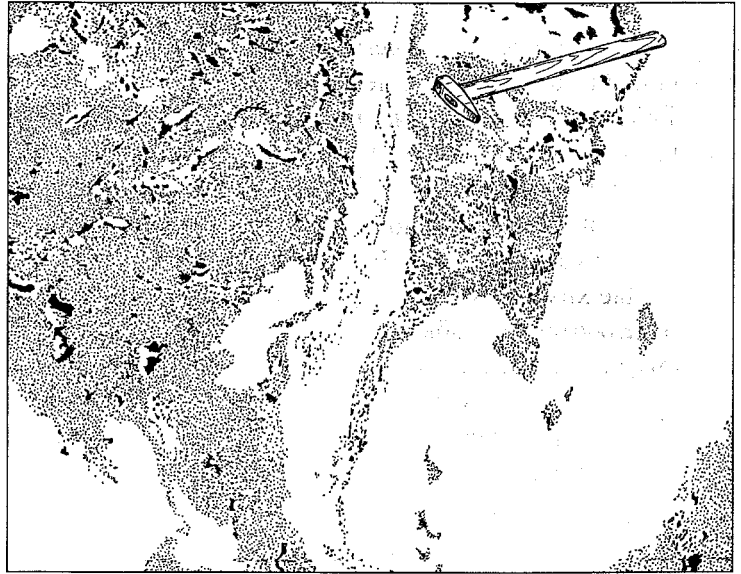
нитных жил плагиоклазитовыми не обнаружено. Имеются редкие случаи пересечения одной плагиоклазитовой жилы другой, однако существование нескольких интрузивных фаз весьма сомнительно. К тому же, обычно жилы разного состава пространственно разобщены, и нет никакой уверенности в том, что они представляют последовательные интрузивные фазы. Отсутствие признаков закалки свидетельствует о том, что жильный материал заполнил разрывы в еще горячей габбровой матрице. Намечается некоторая закономерность в локализации жил: обогащенные кварцем разности тяготеют к периферии ареала, где поле брекчий сменяется зоной одиночных жил в поле роговообманковых габбро.

Горные породы

Габбровому материалу Черноисточинского ареала при однообразии фазового состава свойственна структурно-текстурная пестрота. Подобная неоднородность (такситовое строение, выражающееся в хаотичном чередовании участков, различающихся крупностью зерна, обогащенных или обедненных роговой обманкой, от горнблендитовых до анортозитовых, массивных и полосчатых, мигматитоподобных), вообще свойственна роговообманковым габбро, в том числе и никак не связанным с ПП-серией. По видимому, именно простые зрительные впечатления, а не какие-то точные аналитические данные, могут привести к мысли о том, что в таких текстурах записан процесс анатексиса [Ферштатер и др., 1998, с. 775]. Однако давно и твердо установлено, что все эти структурные разновидности неразличимы по составу фаз, и поэтому генетическая интерпретация такситовых пород на основании только структурно-текстурной картины неубедительна. Для роговообманковых габбро Платиноносного пояса – продукта метаморфической гидратации «сухих» габбро – уже давно было показано, что возникновение анортозитовых и комплементарных им горнблендитовых сегрегаций (рис. 2) непротиворечиво объясняется метаморфической дифференциацией – миграцией вещества при диффузионной компенсации разрывов в габбровой матрице. Рассматривать анортозитовые сегрегации типа изображенных на рис. 2, сложенные плагиоклазом An_{90} , как результат селективного плавления анортозитового габбро или как продукт механического накопления (кумуляции) анортита вообще невозможно.

Рис. 2. Типичная текстурная картина, свойственная роговообманковым габбро в ареалах ретроградного водного метаморфизма в Платиноносном поясе.

В процессе гидратации в условиях растяжения «сухой» габбровый субстрат превращается в габбро-амфиболит-такситовое анортит-роговообманковое габбро (точки). При этом возникают сегрегации анортитового анортозита (белое), представляющие собой результат диффузионной компенсации разрывов (миграции вещества по градиенту давления); в габбровой массе возникают мелкие анортозитовые и комплементарные им горнблендитовые сегрегации (черное). Серебрянский Камень.



Все породы Черноисточинского ареала очень просты по составу. По существу, все они, от горнблендитов до плагиоклазитов, сложены агрегатом роговой обманки и плагиоклаза с примесью магнетита и апатита, различаясь лишь количественными соотношениями двух главных минералов и структурой. Вторичные изменения в общем незначительны и выражаются, главным образом, в появлении эпидота и в сосюритизации плагиоклаза. Породы габбровой матрицы, особенно в удалении от жил, довольно часто содержат также клинопироксен; аксессуарный магнетит содержит от 1,32 до 3,96 мас. % TiO_2 и от 0,25 до 0,86 V_2O_5 . Количество нормативного плагиоклаза (см. рис. 7, В) варьирует в них от 20 мас. % в горнблендитах, не содержащих модалного плагиоклаза, до 80 % в лейкократовых разностях, близких к анортозиту. Среди пород жильной серии преобладают содержащие 80–95 % плагиоклаза, однако встречаются и разности диоритовидного облика с 60–80 % последнего. Все они, как правило, содержат аксессуарный магнетит и сфен. По содержанию кварца они составляют непрерывный ряд – от бескварцевых до содержащих 45 % нормативного кварца (см. рис. 4, В). Модалный кварц появляется только в разностях, салическая часть которых составляет 85 % и более. В этой области количества кварца и плагиоклаза связаны обратной линейной зависимостью, т.е. возрастание первого компенсируется уменьшением второго. Самые высокие (более 20 %) содержания кварца свойственны разно-

стям типа плагиогранита, салическая часть которых составляет 95 % и более.

Микроструктуры, среди которых директивные редки, весьма разнообразны по крупности зерна. В габбровой матрице преобладают эквигранулярные, среднезернистые агрегаты с аллотриоморфной («габбровой») структурой, более или менее приближающейся к типичной гранобластовой, при заметном ксеноморфизме разобщенных зерен роговой обманки (агрегаты последней, как и плагиоклаза, имеют гранобластовую структуру); магнетит слагает сидеронитовые выделения в интерстициях между зернами силикатов. Обычны, особенно для базитовых блоков в плагиоклазитовой массе, мелкозернистые гранобластовые структуры роговикового типа. Структура плагиоклазового агрегата в жильных породах и цементе брекчий, как правило, средне- или крупнозернистая, изометрически-зернистая, близкая к гранобластовой. В плагиогранитах плагиоклаз образует идиоморфные по отношению к кварцу, часто зональные, выделения.

В контактах жил, макроскопически резких, под микроскопом обнаруживается быстрый, однако все же довольно постепенный, шириной в несколько минеральных зерен, переход от базитового вещества матрицы или блока к жильной породе. В узкой переходной зоне происходит смена структуры и относительных количеств роговой обманки и плагиоклаза, но без каких-либо видимых изменений их состава, что подтверждается анализами минералов из кон-

тактов. Таким образом, здесь отсутствует зона физической прерывности, – матрица и жилы как бы спаяны в единое целое, чем и объясняется отмеченное выше их механическое единство.

Габбровая матрица и жильная ПП-серия химически дискретны (новые анализы пород на петрогенные элементы и Sr приведены в табл. 1; в диаграммах использованы, кроме них, данные из работы Г.Б. Ферштатера и др. [1998]). Две химические совокупности отчетливо выделяются на любых петрохимических диаграммах (рис. 3; см. также рис. 8). Габбро слагают широкое поле, ограниченное лишь рамками системы роговая обманка – плагиоклаз – магнетит. Структура химического множества ПП-серии иная – это непрерывный протяженный ряд. Однако в очень узкой области фигуративные точки ультралейкократовых (истинно анортозитовых) разностей габбро перекрываются с точками наиболее богатых Mg и Ca членов ПП-серии.

Минералы и парагенезисы

Новые микрозондовые анализы клинопироксена, приводимые впервые, и роговой обманки приведены в табл. 2; в диаграммах использованы также анализы роговой обманки из работы Г.Б. Ферштатера и др. [1998].

Клинопироксен имеет специфический состав: это низкожелезистый высококальциевый салит без признаков высокотемпературного распада, свойственный исключительно продуктам гидратации габбро, т.е. метаморфизма амфиболитовой фации с участием водного флюида (ниже – «водный метаморфизм»), в том числе анортит-роговообманковым габбро так называемого серебрянского типа. Физиографически он выглядит как замещаемый роговой обманкой, но в то же время равновесен с нею и, по всем оценкам, является наиболее низкотемпературным конечным членом метаморфического пироксенового тренда Платиноносного пояса, фазой, избыточной по отношению к образующейся в равновесных количествах роговой обманке [Ефимов и др., 1999]. Клинопироксен присутствует в габбро, содержащих плагиоклаз более основной, чем An_{30} .

Плагиоклаз. Состав плагиоклаза измерен в иммерсии, методом фокального экранирования, результаты которого сравнимы по точности с химическими определениями, а для лейкократовых разностей – с вычисленным составом

нормативного плагиоклаза, и, кроме того, позволяют судить о диапазоне его состава в пределах образца (т.е. о степени равновесности, количественно выражающейся как разница между «верхним» и «нижним» плагиоклазом, что было неоднократно показано массовыми измерениями [Ефимов, Ефимова, 1967]). Эта разница достигает 20 мол. % An (рис. 4, А, Б), что говорит о наличии зональности (более точные данные, возможно, будут получены с помощью микрозонда, но едва ли изменят общую картину). Наиболее существенный факт состоит в том, что в габбро весь диапазон состава плагиоклаза очень широк – от An_{35} до An_{90} . Битовнит-анортитовые габбро с роговой обманкой и клинопироксеном встречаются на внешней границе и в некотором удалении от ареала ПП-серии, внутри же ареала в габбро преобладает основная андезин – лабрадор. Содержание Sr в плагиоклазе габбро находится в пределах от 1060 до 2000, в плагиоклазе жил – от 1180 до 4200 г/т (см. табл. 1).

Вся совокупность пород Черноисточинского ареала содержит плагиоклаз в диапазоне от An_{20} до An_{90} ; а в интервале An_{45} – An_{60} этого диапазона габбро и жилы по составу плагиоклаза статистически неотличимы (рис. 4, В). При этом в габбро состав плагиоклаза не зависит от количества роговой обманки, в то время как в ПП-серии эта зависимость становится заметной: с увеличением количества роговой обманки плагиоклаз изменяет состав от An_{20} до An_{60} . Эта же зависимость становится еще более явной при сопоставлении состава плагиоклаза с количеством нормативного кварца (рис. 4, Г). Самый кислый плагиоклаз, таким образом, свойствен плагиогранитам, однако нельзя говорить о строгой корреляции состава плагиоклаза с количеством роговой обманки – имеет место лишь частичное перекрытие двух статистических групп. Что касается второго утверждения, то оно также не находит подтверждения (рис. 5, А).

Роговая обманка в целом относится к низкотитанистой умеренно глиноземистой обыкновенной роговой обманке. На диаграмме $(Na+K) - Al^{IV}$ (рис. 5, А) все множество роговых обманок разделено на две совокупности, соответствующие габбро и ПП-серии. Поля совокупностей перекрываются в такой степени, что говорить о каких-то дискретных типах (или рядах) роговой обманки не представляется возможным. То же можно наблюдать на ди-

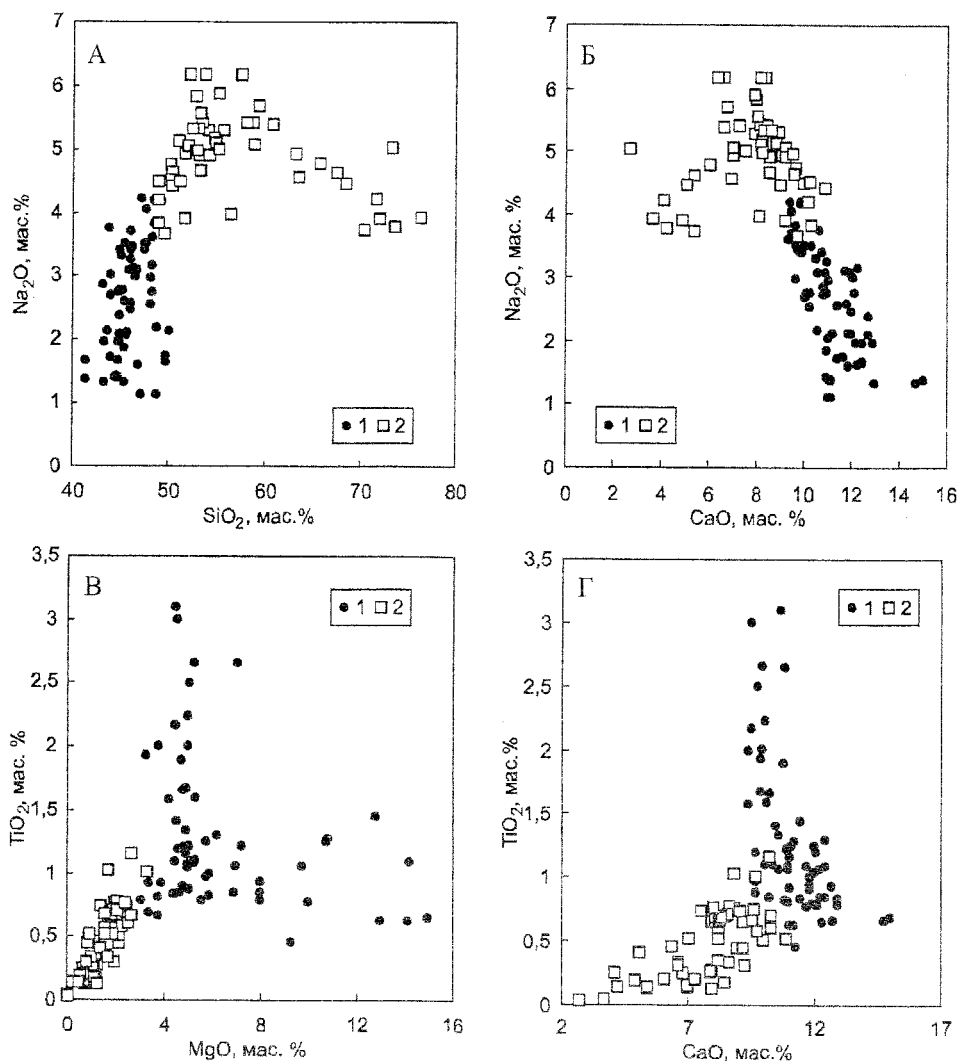


Рис. 3. Химическая дискретность габбровой матрицы и жильной плагиоклазит-плагиогранитной серии Черноисточинского арела.

А – химическая дискретность габбро и жил в отношении SiO_2 и Na_2O при близости крайних членов двух групп по этим характеристикам. В отличие от габбро, жильная группа представляет собой протяженный ряд по SiO_2 при преобладании бескварцевых составов. Б – то же для CaO и Na_2O – граница между группами достаточно резка, перекрытие полей незначительно. В – в отличие от габбро, в жильной группе отчетлива корреляция MgO и TiO_2 , причем в последней максимальные концентрации TiO_2 достигают «габбрового» уровня. Г – то же для CaO и TiO_2 ; здесь корреляция этих оксидов в жильной серии особенно отчетлива по сравнению с таковой в габбро. 1 – все разновидности пород габбровой матрицы; 2 – все разновидности пород жильной серии.

аграммах, связывающих железистость с содержаниями TiO_2 и MnO (рис. 5, Б, В). По железистости роговые обманки вообще неразличимы (преобладают составы в диапазоне 40–50 ат. %); содержания MnO выше 0,5 % свойственны только ПП-серии, однако и здесь дискретность отсутствует, и поля совокупностей перекрываются. Таким образом, в отношении главных компонентов роговые обманки габбро и ПП-серии статистически неразличимы.

Некоторые выводы. Будучи химически дискретными, габбро и ПП-серия различаются количественными соотношениями роговой обманки и плагиоклаза, но по парагенезисам весьма близки. В широкой области фазовый состав этих внешне (и химически) контрастных пород одинаков. Это следует даже из статистических сравнений, основанных на выборке случайных образцов, охватывающей большую площадь. Анализы минералов из контактов габбро и пла-

Таблица 1

Анализы горных пород на петрогенные компоненты (мас. %) и Sr и плагиоклаза на Sr (г/т)

М	ГП	№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ш.п.	P ₂ O ₅	Сумма	Sr	Sr _{pl}	
Породы габровой матрицы, вмещающие жильные породы плагиоклазит-плагиогранитной серии, и их блоки в жилах																		
1	2	22861	43,31	0,833	20,95	4,94	6,52	0,143	4,48	12,93	1,97	0,18	1,16	0,62	98,06	937	2000	
1	2	22863	50,20	0,456	13,34	4,15	5,78	0,198	9,31	11,24	2,12	0,32	1,7	0,08	98,90	447	—	
2	2	11286	48,30	1,582	18,83	5,9	5,78	0,173	4,21	9,38	3,60	0,28	1,81	0,32	100,18	761	—	
2	2	11288	47,63	0,971	17,24	6,18	5,42	0,208	5,73	9,66	3,51	0,32	1,29	0,14	98,32	645	—	
2	3	11291-1	45,40	1,092	10,05	4,92	6,86	0,247	14,21	10,99	1,85	0,33	2,14	0,07	98,20	182	—	
2	2	11292-1	46,30	2,493	17,38	6,65	6,14	0,190	5,05	9,74	3,46	0,33	1,91	0,42	100,10	1100	—	
2	2	22589	47,16	1,930	20,89	5,58	5,62	0,132	3,26	9,86	4,20	0,15	—	0,63	99,44	903	1300	
2	2	22590-1	45,22	1,410	18,83	6,74	6,86	0,146	4,54	10,49	3,31	0,30	1,37	0,48	99,72	996	—	
2	2	22591-1	46,02	1,219	15,79	4,27	7,22	0,198	7,26	10,89	3,08	0,35	1,62	0,16	98,10	723	—	
2	5	22591-2	43,14	2,648	15,86	8,08	7,58	0,176	5,23	10,86	2,87	0,33	1,37	1,12	99,30	802	—	
2	4	22594	47,53	1,895	15,65	5,23	7,95	0,164	4,71	10,76	3,39	0,27	1,03	0,23	98,85	469	—	
2	4	22595	48,56	1,999	19,18	4,62	6,14	0,154	3,78	9,39	4,18	0,27	0,93	0,46	99,69	731	1400	
2	2	27197	46,11	2,004	17,07	6,31	7,95	0,190	4,96	9,91	3,39	0,26	1,24	0,26	99,69	405	—	
2	2	27198-1	48,59	0,878	18,23	5,07	5,78	0,195	5,07	9,68	3,81	0,30	1,57	0,17	99,36	932	—	
2	2	27201	47,74	2,162	17,94	4,45	7,22	0,176	4,51	9,49	4,03	0,29	1,20	0,48	99,72	794	—	
2	2	27202	46,05	3,002	15,60	7,06	7,95	0,291	4,53	9,50	3,69	0,25	0,89	1,22	100,03	340	—	
2	2	27203	49,24	1,676	18,24	4,90	5,42	0,177	4,93	9,87	4,17	0,29	0,91	0,24	100,08	851	—	
2	3	27205	49,82	0,645	7,35	2,64	6,86	0,208	14,98	12,28	1,63	0,28	1,55	0,09	98,35	116	—	
3	2	22823	44,95	0,925	23,28	3,64	6,82	0,147	3,89	12,70	2,09	0,13	1,03	0,10	99,72	544	1580	
3	2	22828-1	44,99	0,666	27,77	2,31	5,06	0,096	2,65	12,71	2,38	0,23	0,87	0,48	100,22	996	—	
3	5	22828-2	44,80	1,084	18,74	4,70	9,03	0,205	5,25	12,45	1,96	0,29	1,38	0,15	100,06	546	—	
3	2	22829-1	45,00	1,059	15,75	3,93	9,03	0,218	6,98	12,21	1,96	0,33	1,63	0,27	98,39	—	—	
3	5	22829-2	43,76	1,253	18,29	3,93	10,11	0,200	5,76	11,98	2,13	0,31	1,64	0,32	99,71	764	—	
3	2	22830	41,37	1,298	18,84	6,17	8,31	0,211	6,22	12,42	1,67	0,28	1,87	0,32	99,00	716	—	
3	2	22831	45,14	1,212	18,07	5,46	8,31	0,224	5,08	10,95	2,77	0,28	1,8	0,42	99,74	624	—	
3	2	22832	47,76	1,096	18,14	5,52	7,22	0,213	4,46	10,04	3,49	0,27	1,35	0,36	99,94	664	1160	
3	2	22834	44,88	0,843	16,74	4,27	7,95	0,190	6,92	12,44	1,66	0,31	1,64	0,15	98,01	—	—	
3	2	22835-1	45,34	0,783	25,59	3,19	5,05	0,098	3,07	12,13	2,77	0,24	1,26	0,59	100,13	1450	—	
3	5	22835-2	45,83	0,939	15,20	4,54	7,22	0,205	8,00	11,84	2,11	0,33	1,55	0,21	98,00	581	—	
3	2	22853	44,79	1,591	16,03	5,84	10,11	0,248	5,29	10,14	2,75	0,34	2,27	0,27	99,70	—	—	
3	2	22854-1	46,65	1,195	17,76	5,41	8,67	0,220	4,63	9,70	2,98	0,39	1,60	0,39	99,53	—	—	
3	1	22855	49,79	0,770	9,87	3,72	9,03	0,265	9,98	11,70	1,74	0,35	1,93	0,13	99,29	344	—	
3	1	35029	46,08	1,043	19,76	3,95	7,90	0,204	4,96	11,97	2,46	0,19	1,34	0,08	99,96	503	—	

Окончание таблицы 1

М	ГП	№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	П.п.п.	P ₂ O ₅	Сумма	Sr	Sr _{pl}	
3	2	35035	48,23	0,844	19,76	4,33	5,80	0,154	4,66	10,25	2,54	1,03	2,08	0,20	99,89	591	—	
4	2	22885	46,14	0,837	22,97	4,63	4,71	0,153	4,43	11,45	2,57	0,13	1,13	0,14	99,31	570	1160	
4	1	22886	41,44	0,686	26,59	4,52	4,35	0,093	3,40	15,00	1,37	0,09	1,06	0,87	99,49	1200	2000	
4	2	22887	43,40	0,660	26,53	3,94	5,44	0,102	3,75	14,73	1,33	0,09	0,66	0,08	100,73	1140	—	
4	2	22888	43,79	3,092	17,83	6,23	7,61	0,225	4,49	10,65	3,74	0,15	1,15	1,21	100,19	617	—	
4	2	22889	46,11	0,813	22,88	4,35	5,44	0,148	3,76	10,97	3,25	0,17	1,11	0,35	99,37	997	1940	
4	2	22891	48,83	1,339	16,81	3,68	9,03	0,227	4,94	10,58	2,18	0,29	1,56	0,36	99,85	455	—	
4	1	22895	45,39	0,783	19,16	2,74	7,90	0,197	5,58	12,94	1,33	0,15	1,34	0,05	97,58	—	1060	
Породы жильной плагиоклазит-плаггиогранитной серии и цемента брекчий																		
2	6	11287	51,06	0,761	24,90	2,91	2,89	0,080	2,01	8,84	5,12	0,27	1,19	0,25	100,29	1280	—	
2	6	11291.2	50,33	1,002	23,40	2,57	3,61	0,094	3,34	9,68	4,74	0,29	0,97	0,38	100,42	2000	—	
2	6	11292.2	52,75	0,442	25,10	2,69	1,16	0,078	2,16	8,95	5,31	0,26	1,55	0,33	100,79	2150	—	
2	6	22587	49,02	0,500	25,57	2,34	3,26	0,047	2,16	9,98	4,48	0,14	0,98	0,52	99,01	1500	2900	
2	6	22588	49,58	0,575	25,41	4,03	2,54	0,056	2,28	9,77	3,64	0,14	1,41	0,43	99,87	1750	4200	
2	6	22590-2	48,93	1,159	24,21	3,47	3,61	0,075	2,66	10,21	4,18	0,26	1,06	0,46	100,30	2000	—	
2	6	22591-3	50,51	0,745	24,46	3,07	2,89	0,057	2,03	9,61	4,63	0,29	1,10	0,43	99,83	1900	—	
2	6	27198-2	51,75	1,022	25,65	3,17	2,17	0,055	1,70	8,80	4,93	0,23	0,84	0,33	100,66	2300	—	
3	6	22827	67,61	0,121	18,56	1,65	1,44	0,031	0,79	5,42	4,62	0,24	0,34	0,06	100,89	856	—	
3	6	22833	63,58	0,138	21,06	1,48	0,72	0,026	0,73	6,97	4,55	0,24	0,88	0,08	100,46	1100	1180	
3	6	22833-2	63,36	0,151	20,63	1,16	1,08	0,026	0,73	7,00	4,93	0,13	0,75	0,09	100,04	—	—	
3	6	22852	54,20	0,273	24,41	1,63	3,97	0,064	1,30	7,95	5,28	0,27	0,90	0,13	100,38	1240	—	
3	6	22854-2	55,67	0,260	25,75	2,60	0,72	0,052	1,15	7,94	5,28	0,26	0,79	0,15	100,63	1600	—	
3	6	22857	51,76	0,776	24,73	3,76	3,26	0,091	2,08	8,65	4,93	0,19	0,55	0,31	101,10	1360	—	
3	6	22890	52,91	0,654	24,39	2,76	3,59	0,119	1,80	7,99	5,82	0,17	0,74	0,29	101,24	1240	1860	
3	6	35031-2	48,98	0,600	24,55	3,82	3,25	0,097	2,55	10,30	3,81	0,24	1,23	0,36	99,80	1250	—	
3	6	35040	54,85	0,339	24,05	2,37	2,54	0,080	1,68	8,25	5,17	0,23	0,52	0,30	100,39	1200	—	
3	6	35041	53,52	0,647	23,61	2,64	3,26	0,085	1,71	8,12	5,42	0,23	0,62	0,24	100,11	1050	—	
5	6	22858	71,80	0,247	14,54	1,83	1,80	0,054	0,72	4,11	4,22	0,14	0,28	0,04	99,79	754	—	
5	6	22859	57,43	0,330	23,20	1,56	2,21	0,055	1,03	6,62	6,16	0,21	0,43	0,13	99,37	1140	—	
5	6	22860	57,74	0,458	22,73	1,50	3,23	0,069	1,16	6,38	6,16	0,14	0,44	0,13	100,02	—	—	
5	6	22866	59,38	0,240	23,12	2,08	0,72	0,059	1,09	6,80	5,69	0,26	0,69	0,12	100,25	1650	—	

Примечание. М – места отбора проб: 1 – южное окончание Черноисточинского пруда; 2 – острова в южной части пруда; 3 – полуостров в северной части пруда; 4 – северозападное побережье пруда; 5 – восточное побережье пруда, около устья р. Свистухи. ГП – петрографические разновидности горных пород: 1 – клинопироксен-роговообманковые габбро; 2 – роговообманковые габбро; 3 – горнблендиты; 4 – мелкозернистые (роговкоподобные) разновидности роговообманково-плагиоклазовых базитов; 5 – мелкозернистые (микрогаббровые) жильные обособления в габбро; 6 – все породы жильной плагиоклазит-плаггиогранитной серии. В одноименных образцах индексом «1» обозначен базитовый материал, слагающий блоки в брекчиях, индексом «2» – плагиоклазит-плаггиогранитный цемент брекчий.

Представительные микронзондовые анализы минералов (мас. %)

ГП	МИН	№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	f
Клинопироксен													
1	Срх	22823	51,01	0,17	1,26	9,20	0,47	13,23	23,43	0,05	—	99,62	27,7
1	Срх	22855	51,41	0,13	1,00	8,28	0,41	14,77	23,56	0,55	—	100,3	24,8
1	Срх	22886	50,47	0,31	1,41	9,06	0,32	13,35	23,19	0,89	—	100,47	28,3
1	Срх	22886	50,65	0,78	2,65	9,07	0,28	13,26	23,40	0,56	—	100,84	28,4
1	Срх	22887	50,46	0,41	2,25	7,79	0,33	14,84	23,40	0,99	—	100,48	23,5
1	Срх	22887	51,34	0,70	2,58	8,62	0,32	13,75	22,17	0,48	—	100,05	26,8
1	Срх	22895	50,65	0,22	1,67	10,07	0,36	13,34	23,23	0,90	—	100,44	30,4
Роговая обманка													
2	Am	22862	44,15	1,14	8,67	18,01	0,32	11,84	11,70	2,23	0,29	98,35	46,5
2	Am	11288	42,71	1,45	9,48	17,07	0,35	12,95	11,20	2,78	0,22	98,21	43,0
3	Am	11291-1	45,48	0,86	9,50	11,60	0,28	15,43	11,48	2,18	0,26	97,07	30,2
2	Am	22591-1	44,33	1,50	10,23	14,48	0,31	12,99	11,57	2,71	0,25	98,37	40,0
5	Am	22591-2	44,72	1,46	10,00	14,18	0,27	13,17	11,49	2,92	0,25	98,46	38,1
3	Am	27205	47,72	0,57	6,78	9,85	0,28	18,27	12,10	2,37	0,18	98,12	23,7
2	Am	22823	43,54	1,47	9,82	18,04	0,34	11,46	11,47	2,23	0,23	98,60	47,4
2	Am	22824	43,44	1,29	9,49	16,90	0,27	12,29	11,65	2,27	0,22	97,82	43,9
2	Am	22830	43,20	1,38	10,91	16,52	0,35	11,75	11,44	2,51	0,20	98,26	44,6
2	Am	22835-1	43,40	1,27	10,17	18,22	0,30	11,06	11,49	2,41	0,27	98,59	48,5
5	Am	22835-2	44,52	1,19	10,03	14,86	0,29	13,59	11,59	2,25	0,27	98,59	38,5
1	Am	22855	45,53	0,66	6,88	14,09	0,36	15,37	11,94	1,64	0,19	96,66	34,5
2	Am	35030	43,47	1,34	8,96	17,19	0,43	13,13	11,53	2,02	0,26	98,33	42,9
4	Am	22886	42,77	1,89	10,17	16,89	0,29	11,48	11,86	2,74	0,19	98,28	45,6
4	Am	22887	45,23	0,67	8,61	15,20	0,27	13,32	12,18	1,44	0,20	96,92	39,5
4	Am	22887	42,73	1,33	9,41	16,70	0,31	12,92	11,98	2,24	0,23	97,85	42,5
2	Am	22889	43,62	1,23	8,77	18,08	0,40	12,49	11,24	2,15	0,26	98,24	45,4
1	Am	22895	44,91	0,94	7,33	18,57	0,29	12,90	11,61	1,66	0,19	98,40	45,1
3	Am	11291-1	43,62	1,77	10,78	14,85	0,29	12,88	11,32	2,65	0,26	98,42	39,7
6	Am	22591-3	43	2,07	10,43	17,08	0,29	11,59	11,38	2,89	0,3	99,03	45,7
6	Am	22827	42,9	1,07	8,31	18,38	0,59	12,10	11,22	1,99	0,21	96,77	46,8
6	Am	22852	44,26	1,25	9,23	17,27	0,48	12,56	11,33	2,00	0,25	98,63	44,2
6	Am	22857	45,18	1,09	8,10	17,06	0,48	12,24	11,21	1,95	0,23	97,54	44,6
6	Am	22890	44,41	1,14	6,88	17,36	0,63	14,01	11,24	1,70	0,22	97,59	41,9
6	Am	35040	44,46	0,76	7,60	17,60	0,48	13,27	11,26	1,83	0,23	97,49	43,3
6	Am	22859	44,74	1,02	7,43	16,43	0,61	14,82	10,96	1,79	0,21	98,01	39,2

Примечание. ГП – горная порода (обозначения см. в табл. 1); МИН – минерал (Срх – клинопироксен, Am – роговая обманка); f – общая железистость (ат. %).

Геохимия

гиоклазитовых жил, т.е. пространственно сближенные, свидетельствуют, что в таких случаях достоверная разница в составе фаз вообще отсутствует. Фазовое сходство позволяет считать, что матрица и жилы приближены к состоянию химического равновесия, т.е. составляли единую термодинамическую систему.

Данные по концентрациям следовых элементов, в том числе всей группы РЗЭ, в породах и роговой обманке, полученные методом ICP MS, содержатся в статье Г.Б. Ферштатера и др. [1998]; многочисленные новые анализы на Sr приведены в табл. 1.

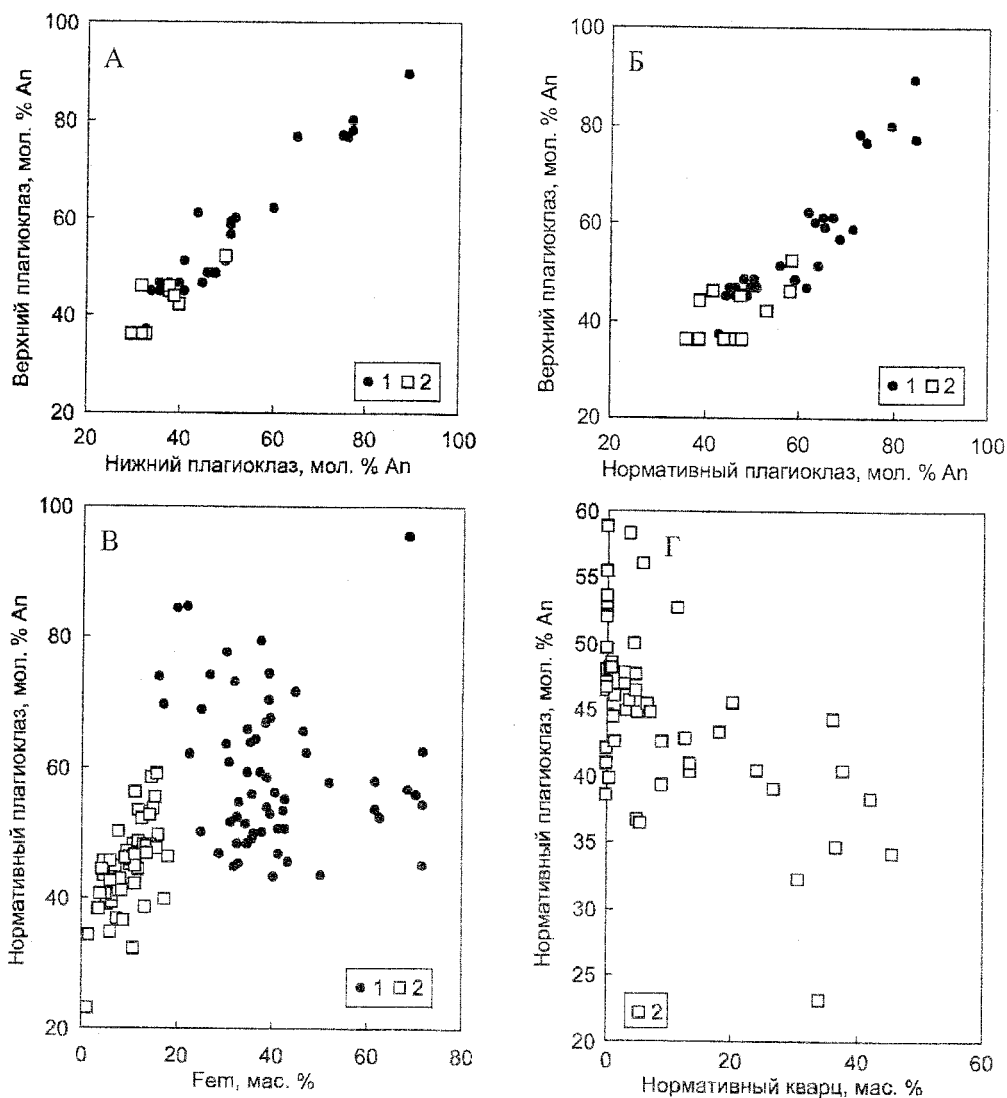


Рис. 4. Состав плагиоклаза в породах Черноисточинского ареала.

А – общий диапазон состава и степень равновесности плагиоклаза («верхний» и «нижний» плагиоклаз – диапазон состава в пределах пробы). Б – сопоставление состава нормативного и модального плагиоклаза. В – сопоставление состава нормативного плагиоклаза и количества роговой обманки (последнее связано коэффициентом пропорциональности около 1,3 с характеристикой нормативного состава FeO, равной 100 % минус сумма полевых шпатов и кварца). В габбро связи между этими двумя характеристиками нет, но в жильных породах корреляция достаточно отчетлива. Г – отчетливая корреляция состава плагиоклаза и количества кварца в породах жильной серии. Наиболее кислый плагиоклаз свойствен различиям, химически близким к плагиогранитам. Условные обозначения те же, что на рис. 3.

Геохимия РЗЭ. Графики нормированных составов РЗЭ в габбро и в породах ПП-серии достаточно широко растянуты по оси концентраций, но геометрически подобны, что делает корректным использование суммы РЗЭ как некоего совокупного лантаноида. Диапазон суммарных концентраций РЗЭ внушительен и закономерен – от 3 г/т в плагиограните до 120 г/т в горнблендите. Из диаграммы, связывающей сумму РЗЭ и количество роговой обманки (рис. 6, А),

следует, что содержание РЗЭ в породах ареала есть приблизительно линейная функция содержания роговой обманки с достаточно однообразным содержанием РЗЭ (в пределах 60–120 г/т). Составы роговой обманки из горнблендитов, габбро и ПП-серии по сумме РЗЭ перекрываются. Близкий к линейному закон распределения валовых содержаний (в идеале – прямая линия, символизирующая постоянство содержания компонента в фазе независимо от ее коли-

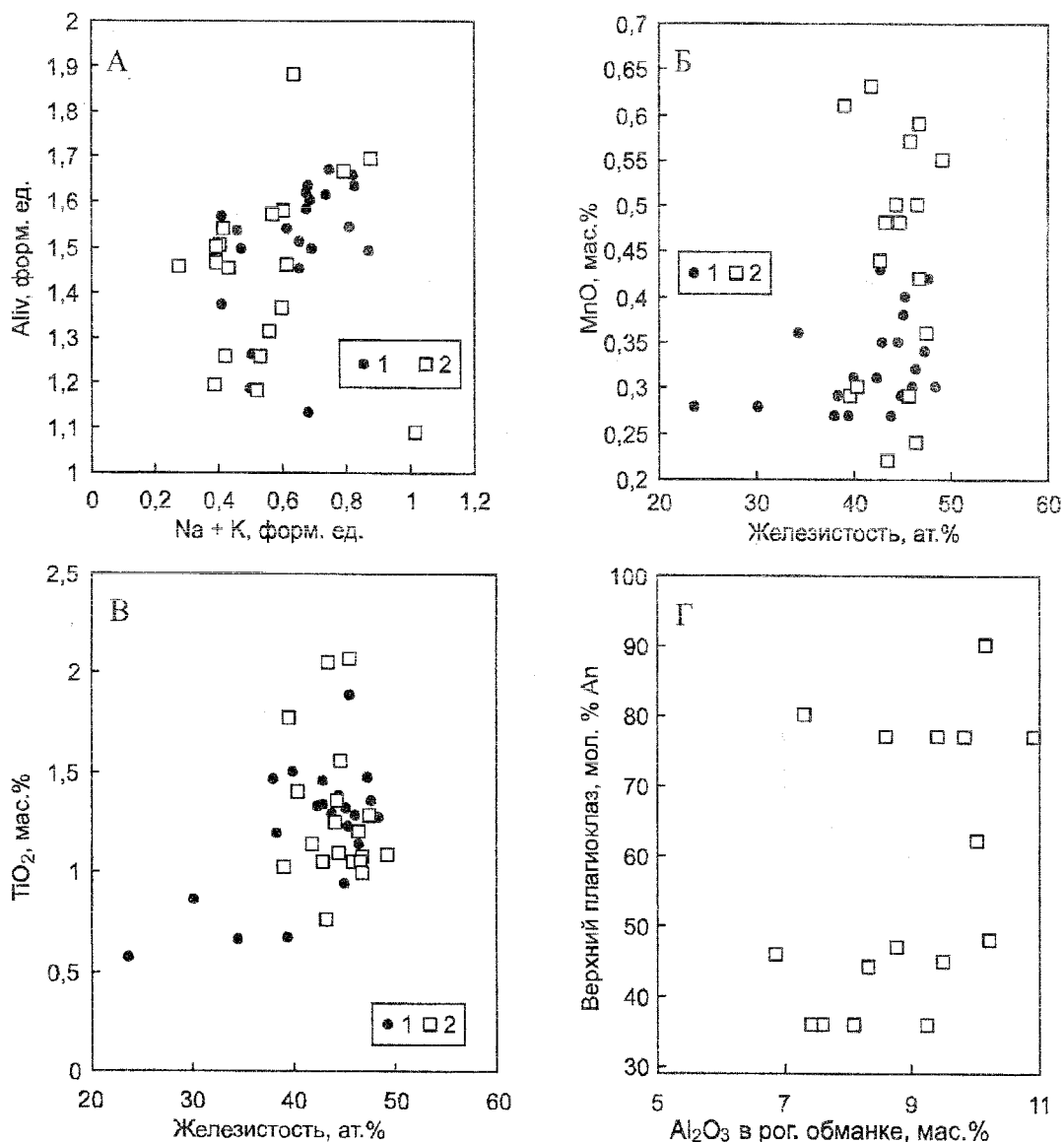


Рис. 5. Состав роговой обманки в породах Черносточинского ареала.

А – сопоставление суммы щелочей и тетраэдрического Al. Отчетливо видно, что по этим главным характеристикам составы роговых обманок в габбро и жильной серии статистически не различаются. Б, В – сопоставление роговых обманок в габбро и жильной серии по общей железистости и содержаниям MnO и TiO₂. Наблюдается практически та же картина перекрытия полей, несколько менее отчетливая в отношении MnO. Г – отсутствие сколько-нибудь заметной корреляции составов роговой обманки и плагиоклаза в отношении Al₂O₃. Условные обозначения те же, что на рис. 3.

чества) говорит о некоем эквипотенциальном резервуаре, в котором концентрация РЗЭ в главном минерале-концентраторе была достаточно постоянной независимо от его количества. Смешивание последнего с «балластом» (плагиоклаз, кварц) дает весь ряд валовых составов по РЗЭ. Небольшие отклонения вызваны как понятными естественными флуктуациями (образцы пространственно разобщены), так и,

возможно, иногда примесью какого-то еще минерала-носителя.

Геохимия цинка. Диапазон содержаний Zn в роговой обманке габбро и ПП-серии (в том числе и в роговой обманке плагиогранитов) одинаков, т.е. все роговые обманки во всех породах представляют собой единую химическую совокупность в отношении Zn. Наблюдается тот же, что и для РЗЭ, близкий к линей-

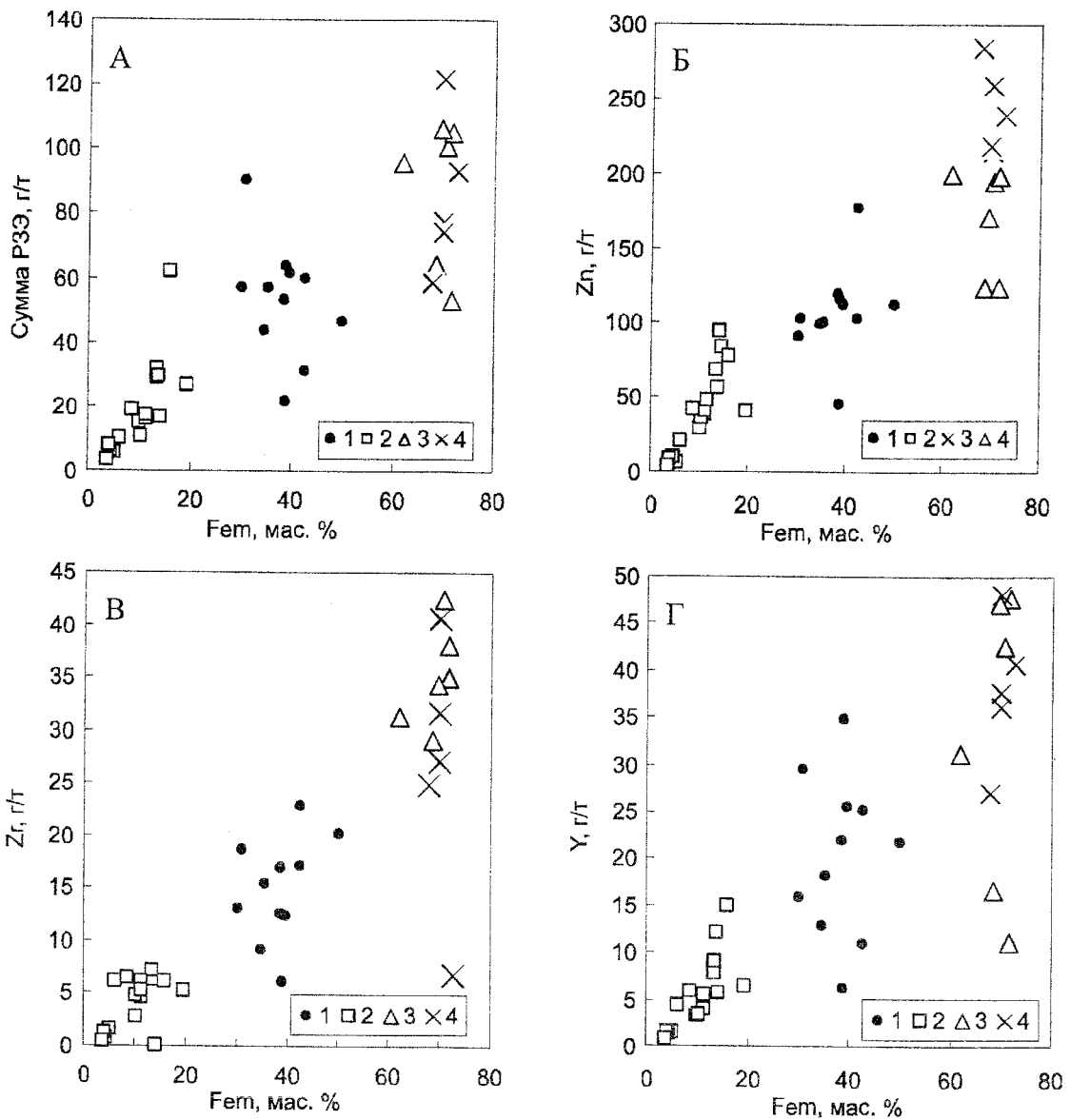


Рис. 6. Диаграммы, демонстрирующие близкий к линейному закон распределения следовых элементов, концентрирующихся в роговой обманке (по данным Г.Б. Ферштатера и др. [1998]).

А, Б, В, Г: в валовых составах концентрации соответственно РЗЭ, Zn, Zr и Y коррелируют с количеством роговой обманки, достигая максимума в почти мономинеральных горнблендитах. Концентрации микроэлементов в роговой обманке из пород разных типов статистически неразличимы. 1 – габбро; 2 – все породы жильной ПШ-серии; 3 – горнблендитовые сегрегации; 4 – мономинеральные фракции роговой обманки.

ному закон распределения валовых концентраций, указывающий на существование эквипотенциального резервуара Zn, каковым является вся геохимическая система (габбровая матрица + жильный штокверк).

Геохимия циркония, иттрия, ванадия. Картина распределения этих элементов в породах и роговой обманке полностью повторяет таковую для РЗЭ и цинка (рис. 6, В, Г; рис. 7, А). Особенно хорошо выражены

линейный закон распределения и отсутствие значимых различий между составами роговой обманки во всех породах для Zr.

Геохимия стронция. Все породы Черноисточинского ареала обогащены Sr, что вообще характерно для Платиноносного пояса. На диаграмме Sr – количество плагиоклаза (рис. 7, В), где использованы многочисленные новые анализы (см. табл. 1), отчетливо видно, что содержание Sr во всем ряду черноисточин-

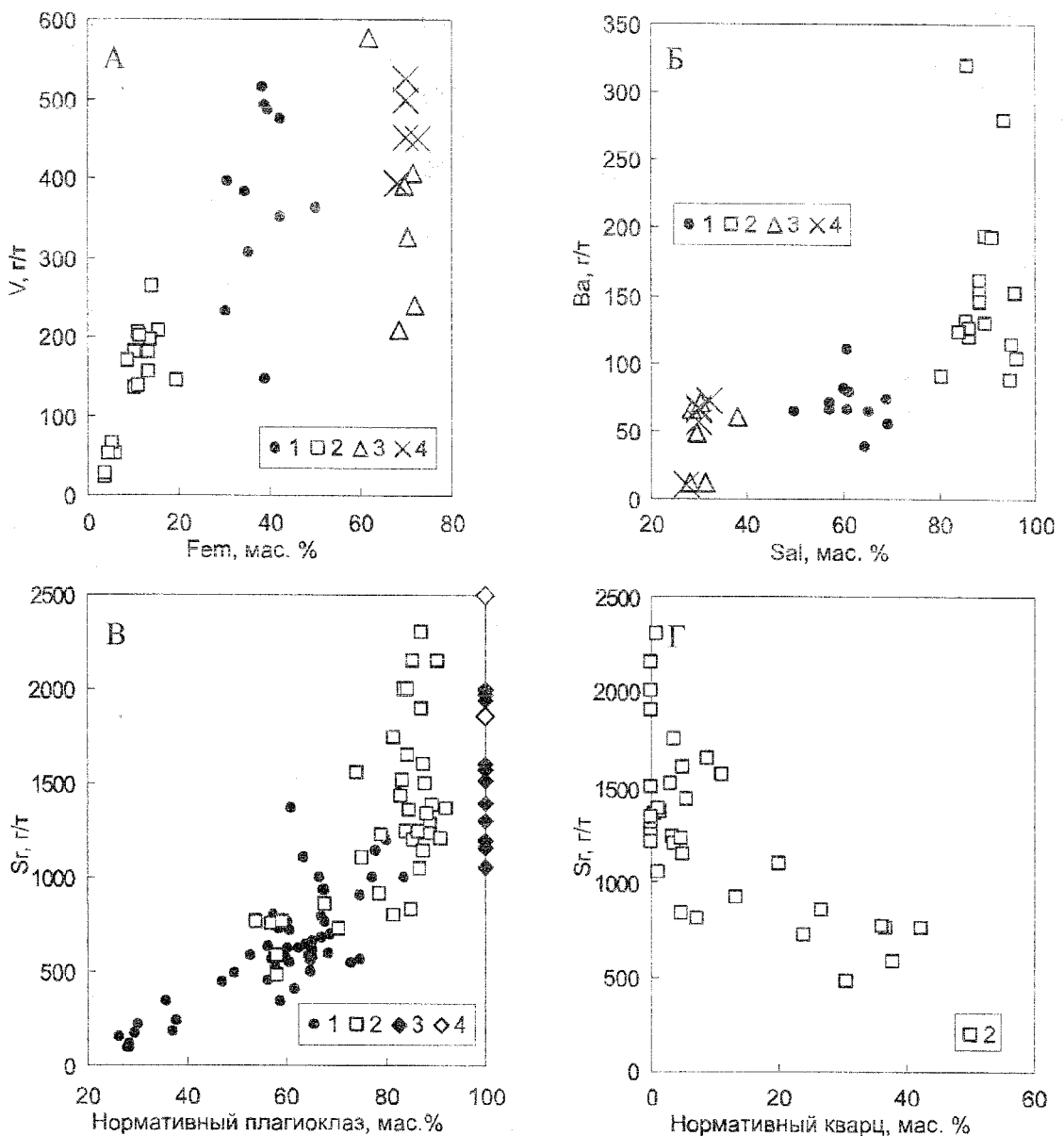


Рис. 7. Диаграммы, демонстрирующие близкий к линейному закон распределения следовых элементов, концентрирующихся в роговой обманке и плагиоклазе. По данным Г.Б. Ферштатера и др. [1998] и автора.

Корреляция: А – содержания V с количеством роговой обманки; Б – содержания Ba с суммой плагиоклаза и кварца (параметр Sal); В – содержания Sr с количеством плагиоклаза; Г – содержания Sr с количеством кварца в породах ПП-серии. Условные обозначения на рис. А, Б и Г те же, что на рис. 6. На рис. В: 1 – все габбро; 2 – все породы ПП-серии; 3 – плагиоклаз (мономинеральные фракции) из габбро; 4 – плагиоклаз (мономинеральные фракции) из плагиоклазитов.

ских пород есть, в общем, функция содержания плагиоклаза. Минимальные содержания свойственны горнблендитам и роговым обманкам, максимальные (2000 г/т и более) – жильным плагиоклазитам. Содержания Sr в плагиоклазе составляют от 1000 до 2000 г/т и даже более, при отсутствии отклонений в меньшую сторону. При

этом плагиоклаз из габбро по диапазону содержаний Sr неотличим от такового ПП-серии. Приближение к линейному закону распределения следует считать удовлетворительным. Из этого следует, что утверждение о существовании габбрового протолита, анагектической плагиоклазитовой выплавки и горнблендитового рести-

та [Ферштатер и др., 1998] особенностями распределения Sr не подтверждается. Логически рассуждая, анатектическая выплавка из плагиоклазсодержащего протолита (габбро) неизбежно должна быть обеднена Sr, поскольку плагиоклаз протолита, в силу высокого коэффициента разделения Sr между плагиоклазом и расплавом, должен удерживать почти весь наличный ресурс этого элемента, и в жидкость должна переходить только незначительная его часть. В действительности все обстоит как раз наоборот: валовой состав жильных плагиоклазитов (гипотетическая выплавка) по сравнению с габбровой матрицей резко обогащен Sr. Однако содержание Sr в плагиоклазе – общем минерале матрицы и «анортозитах» — почти одинаково. Это свидетельствует о том, что химический потенциал Sr был одинаков в матрице и в жилах, что можно истолковать опять-таки единственным образом: матрица и жилы, при большом контрасте в валовых составах, находились в состоянии химического равновесия, слагая единое термодинамическое целое.

Другие микроэлементы. Сведения о других следовых элементах, приводимые Г.Б. Ферштатером и др. [1998], дают верное представление об уровне концентраций. Однако некоторые из них мало информативны из-за крайне низких содержаний (Li, Cs, Вe, Nb, Та, Hf, Mo, Sn, Pb, U и др.), или опять-таки характеризуют линейную связь валовых концентраций микроэлементов либо преимущественно с роговой обманкой (Ni, Co, Sc, V), либо с плагиоклазом (Ba, Rb).

Некоторые выводы. Данные по валовым концентрациям следовых элементов, как и приведенные обычные петрохимические данные, подтверждают существование двух дискретных геохимических совокупностей – габбровой матрицы и секущих ее жил. Однако эти же аналитические данные показывают, что распределение информативных следовых элементов и РЗЭ определяется линейным законом (т.е., иными словами, сходством концентраций элементов-примесей в одноименных фазах всех пород), указывающим на то, что матрица и жилы представляли собой близкую к равновесию геохимическую систему, т.е. единое термодинамическое целое. Аналитические данные по редким элементам, при всей их новизне и точности, не подтверждают существования среди пород Черноисточинского ареала таких категорий, как «протолит», «анатектическая выплавка» и «рестит».

Генезис плагиоклазит-плагиогранитной серии

Экспериментальные данные. Современные экспериментальные исследования дают более чем определенный ответ на вопрос о том, могли ли жильные плагиоклазиты представлять собой магматическую жидкость, как это можно было бы предположить на основании первого впечатления при полевых наблюдениях (упомянутая отчетливая картина, казалось бы, магматических внедрений в твердое габбро или клинопироксенит).

Ранние опыты Г. Йодера и К. Тилли [1965] ничего не говорят о составе парциальных расплавов, полученных в результате плавления базитов (такая задача в то время не ставилась). Современные опыты по плавлению базитов имеют важное приложение к петрогенезису кремнеземистых пород в островных дугах и плавлению океанической коры в зонах субдукции [Ходоревская, Жариков, 1998; Spulber, Rutherford, 1983; Baker, Egger, 1987; Johnston, 1986; Ellis, Thompson, 1986; Helz, 1976; Beard, Lofgren, 1989; Patino, Beard, 1995 и др.]. Множество экспериментов показало, что частичное плавление базитов при давлениях до 10 кбар приводит к образованию кремнеземистой (гранитоидной) выплавки и базитового остатка. Особо следует упомянуть про опыты Дж. Берда и Г. Лофгрена [Beard, Lofgren, 1991] по дегидратационному и с избытком воды плавлению метаморфизованных базальтов (фактически, зеленокаменных пород и амфиболитов, т.е. аналогов роговообманкового габбро), в очень широком диапазоне условий – при температурах от 800 до 1000°C и давлениях от 1 до 7 кбар. Все парциальные расплавы (стекла), множество которых проанализировано на микрозонде, содержат более 25 % нормативного кварца (рис. 8).

Ни в одном из экспериментов не было получено стекол плагиоклазового состава, что лишний раз подтверждает уже цитировавшийся вывод [Боуэн, 1934, с. 172]: «*Не существует жидких магм, состав которых соответствовал бы составу какого бы то ни было плагиоклаза*». В свое время опыты, поставленные с целью приблизиться к пониманию генезиса анортозитов древних щитов, показали, что состав легкоплавких фракций, образующихся при плавлении андезита, близок к гранитному: «*анортозиты никогда не проходят через стадию жидкой магмы*» [Грин, 1968, с. 253].

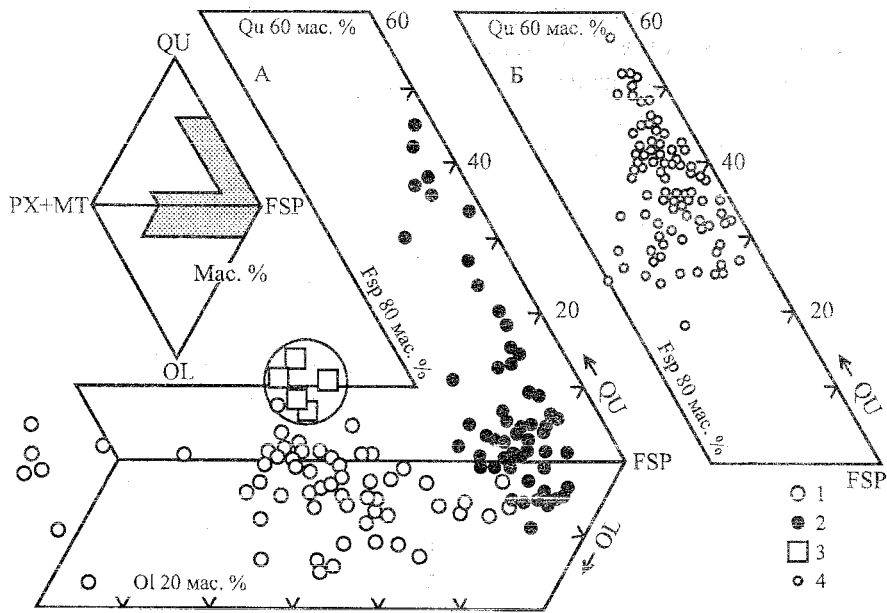


Рис. 8. Четырехкомпонентная петрохимическая диаграмма (проекция на две грани тетраэдра Qu – Fsp – (Px+Mt) – Ol для пород Черноисточинского ареала и продуктов плавления базитов (по экспериментальным данным [Beard, Lofgren, 1991]), демонстрирующая принципиальную невозможность анатексиса роговообманковых базитов с выплавлением магматической жидкости состава плагиоклазита или кварцсодержащего плагиоклазита.

1 – все габбро Черноисточинского ареала; 2 – все породы жильной ПП-серии; 3 – исходные составы, использованные в экспериментах; 4 – все множество парциальных расплавов (стекол), полученных экспериментально во всем диапазоне условий. Нормативные минералы (мас. %): Qu – кварц, Fsp – сумма полевых шпатов, Ol – оливин, (Px+Mt) – фемическая часть после вычета оливина (для оливин-нормативных составов).

Эти опыты дают лишь некую гипотетическую возможность образования плагиоклазовых пород как кумулятов магмы среднего состава. Разумеется, эта модель не имеет никакого отношения к черноисточинскому случаю.

Получить *плагиоклазовую* жидкость можно, только расплавив какой-то *плагиоклазовый же* субстрат. Такой экзотический случай исключить нельзя (например, при импактном событии), однако он не может иметь петрогенетического значения. Таким образом, экспериментальные исследования накладывают непреодолимый запрет на существование плагиоклазовых жидкостей на Земле. Все без исключения многочисленные эксперименты по плавлению широкого диапазона базитовых составов в очень широком диапазоне условий, дегидратационному и с избытком воды, показали, что парциальные расплавы неизменно имеют нормативно кварц-полевошпатовый состав, т.е. соответствуют, в общем, составу гранита. Следовательно, экспериментальные данные накладывают совершенно непреодолимый запрет на

магматическую природу черноисточинских плагиоклазитов. Одной диаграммы (см. рис. 8) достаточно, чтобы утвердиться в этом мнении. Этот запрет не относится к плагиогранитам, входящим в ПП-серию, геологическая (пространственная) связь которых с жильными плагиоклазитами ПП-серии бесспорна. Бесспорны также непрерывные химические тренды плагиоклазит-плагиогранит на петрохимических диаграммах, однако причинно-следственные связи между членами химического ряда из этих диаграмм никак не следуют.

Условия образования ПП-серии. Есть все основания считать, что роговообманково-плагиоклазовые парагенезисы в породах Черноисточинского ареала образовались без участия плавления, при температурах ниже солидуса системы роговая обманка – плагиоклаз, в области совместной устойчивости роговой обманки и плагиоклаза, при давлениях водного флюида около 5 кбар, т.е. в условиях амфиболитовой фации умеренного давления. Именно такие условия существовали в глубинной зоне Платино-

носного пояса перед ее фрагментацией и выведением фрагментов зоны (массивов Пояса) в структуру верхней коры. Однако появление водного флюида связано здесь с внешним источником, каковым могла быть древняя зона субдукции [Ефимов, 1999].

Жилы явно моложе матрицы, но сходство парагенезисов, состава главных минеральных фаз и микроструктур говорит о том, что химически дискретные матрица и жилы изофациальны и приближены к состоянию химического равновесия, т.е. на конечном этапе образования составляли единую термодинамическую систему, в которой химические потенциалы (но не массы!) компонентов были выровнены. На то же указывают геохимические данные. Наконец, экспериментальные данные накладывают совершенно категорический запрет на возможность существования ПП-серии (точнее, бескварцевых и бедных кварцем ее членов) в виде магматической жидкости. Следовательно, есть только одна возможность преодолеть то противоречие между полевыми наблюдениями и петрологическими ограничениями, о котором говорилось в самом начале: предположить, что сеть разрывов в твердой и горячей габбровой матрице (возможно, в этот момент безводной, т.е. имевшей состав оливинового или двушироксенового габбро) первоначально была заполнена магматической жидкостью, а затем уже затвердевший магматический жильный штокверк был модифицирован вместе с матрицей метаморфическим процессом в статической обстановке, при сохранении жилами их морфологии. Принимая во внимание тесную связь плагиоклазитов с плагиогранитами, магматическая природа которых достаточно очевидна, такой магматической жидкостью могла быть только плагиогранитная магма.

Природа жильных плагиоклазитов.

Возможен радикальный вывод, в общем виде уже давно сформулированный А.Н.Заварицким [1928, с.6]: *«Плагиоаплиты... и альбититы являются породами, близкими к тем десилицированным пегматитам, которые возникают при взаимодействии пегматитовых растворов с ультраосновными породами... образование жильных пород дунитовых массивов связано с проникновением в них пегматитовой магмы, реагировавшей на вмещающую породу и дававшей начало продуктам реакции, значительно отличающимся... от первоначальной магмы».* Иными словами,

к ПП-серии Черноисточинского ареала применимо известное представление о десиликации гранита при взаимодействии с гипербазитом, — ее можно рассматривать как продукт десиликации плагиогранитного жильного штокверка при взаимодействии с габбро.

Явления десиликации гранитоидов в гипербазитах, конечно, гораздо более наглядны и убедительны, чем обсуждаемый случай. Во всем подобные черноисточинской ПП-серии аналогичные серии Качканарского [Ефимов, Потапова, 2002] и других массивов Платиноносного пояса локализованы в оливиновых клинопироксенитах, которые даже при большом воображении трудно рассматривать как остаток от выплавления плагиоклазитовой жидкости. Помимо упомянутых теоретических и экспериментальных запретов, принципиально не допускающих существование такого расплава, возможно еще одно простое возражение: этот расплав почему-то не внедрялся во что-либо, кроме гипербазитов и роговообманковых габбро, например, в породы вулканогенной «рамы» (а плагиограниты внедрялись!). Для Полярного Урала описаны эффектные явления десиликации плагиогранитов в существенно оливиновых породах: здесь с высокостронциевыми постофиолитовыми плагиогранитами, слагающими интрузии в гарцбургитах, связан 50-километровый пояс альбититовых жил. Десиликация плагиогранитов не заканчивалась образованием альбититов, но продолжалась и далее, приводя к образованию альбит-нефелиновых пород. Последние явились химическим субстратом для образования в зонах повышенного давления жадеитовых пород по схеме альбит + нефелин = 2 жадеит [Ефимов, Потапова, 1992].

Непрерывность химического ряда ПП-серии Платиноносного пояса означает, что здесь имеется бесчисленное количество петрографических разновидностей — от плагиогранита с 25–40 % нормативного кварца до практически мономинерального плагиоклазита без кварца, а иногда с нормативным нефелином (или оливином, в зависимости от способа расчета нормы). В этом химическом ряду нет дискретности, а имеющиеся статистические максимумы отражают скорее разницу в ходе процесса в разных ареалах. Причину непрерывности ряда следует видеть не в «гомодромной последовательности», как считают Г.Б. Ферштатер и др. [1998], а в степени десиликации исходного плагиогранита.

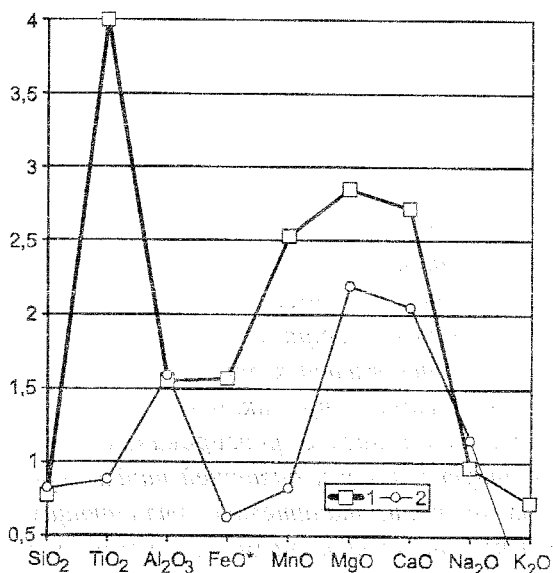
Связь плагиоклазитов с ареалами водного метаморфизма. При всей правдоподобности, предположение о десиликации плагиогранита без дополнительных уточнений не объясняет, почему в одних случаях этот процесс имел место, а в других – нет. Плагиограниты прорывают любые породы габбро-гипербазитовых комплексов и при этом могут оставаться такими даже в отдельных маломощных дайках, плагиоклазиты же наблюдаются только в гипербазитах и роговообманковых габбро. В «сухих» (без роговой обманки) габбро нет плагиоклазитовых жил, присутствуют только плагиогранитные. Из этого следует, что плагиоклазиты связаны во времени и причинно с роговообманковыми габбро – продуктом гидратации «сухих» габбро. Существуют ареалы роговообманковых габбро, например, классический Серебрянский [Ефимов, Ефимова, 1967], в которых этой жильной серии нет. Однако плагиограниты встречаются и в таких ареалах, и вне их, плагиоклазиты же – только внутри них. Следовательно, на видимом эрозионном срезе плагиограниты непосредственно не связаны с ареалами водного метаморфизма, а плагиоклазиты связаны с ними неразрывно. Из этого можно заключить, что десиликация плагиогранитов происходила там и только там, где имела место гидратация вмещающих гипербазитов и габбро, и синхронно с нею.

Однако если метаморфизованные габбро и плагиоклазиты в таких случаях составляют единое целое в отношении фазового состава и структуры, то плагиоклазиты в гипербазитах, напротив, внешне кажутся лишь механически цементирующими обломки последних, окруженные реакционными роговообманковыми каймами, а сама, например, клинопироксеновая матрица производит впечатление неметаморфизованной. Это объясняется тем, что пироксенит даже при избытке воды при температурах водного метаморфизма (около 700°C) устойчив и остается таковым, покуда его химический состав не будет метасоматически изменен на

столько, что станет возможным образование роговой обманки. Ширина реакционной каймы демонстрирует, таким образом, глубину диффузии (биметасоматического обмена компонентами) между жильным веществом и веществом матрицы, но не разницу в водонасыщенности или в интенсивных параметрах метаморфизма между жилами и матрицей. Габбровые ксенолиты обычно лишены реакционных кайм по той причине, что здесь нет необходимости в привносе вещества извне, достаточно присутствия водного флюида; поэтому весь объем габбровых блоков и вся вмещающая габбровая матрица обычно превращаются в агрегат роговой обманки и плагиоклаза.

Можно приблизительно оценить особенности химического обмена между жилами и матрицей, исходя из предположения, что протолитом ПП-серий был плагиогранит и что объем пород не изменялся. В табл. 3 приведены: (1) статистические характеристики химического состава ПП-серий двух ареалов – Черноисточинского (по данным табл. 1 и Г.Б. Ферштатера и др. [1998]) и Качканарского – по данным А.А. Ефимова и Т.А. Потаповой [2002] и (2) то же для тех же составов, нормированных по среднему кытлымскому плагиограниту. Оценка для главных петрогенных компонентов (рис. 9) весьма приближительна, однако в обоих случаях (расчеты по кислородному методу Т. Барта дают примерно те же цифры) безусловно имели место две сопряженных тенденции – вынос SiO₂ (собственно десиликация – нормированные значения около 0,8) и привнос MgO (2,8 и 2,2) и CaO (2,7 и 2,1). В обоих случаях можно гово-

Рис. 9. Средние составы жильных плагиоклазит-плагиогранитных серий Черноисточинского (1, 52 анализа) и Качканарского (2, 49 анализов) ареалов, нормированных по составу плагиогранитного протолита (по данным табл. 3).



Средние и нормированные по плагиограниту составы жильных плагиоклазитов
 Черноисточинского и Качканарского ареалов

Стат. хар.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Sr	Pl _N	Qu
Средний кытлымский плагиогранит (8 анализов)												
X, мас. %	73,79	0,12	14,33	2,86	0,024	0,54	2,87	5,09	0,25	552	23,40	36,11
Черноисточинская ПП-серия – исходные составы (52 анализа)												
X, мас. %	56,99	0,48	22,16	4,46	0,61	1,54	7,81	4,9	0,18	1306	44,73	9,46
σ, мас. %	7,43	0,27	3,39	1,72	0,03	0,72	1,82	0,67	0,16	458	6,79	12,93
V, %	13,04	56,25	15,30	38,57	4,92	46,75	23,30	13,67	88,89	35,07	15,80	136,68
Качканарская ПП-серия – исходные составы (49 анализов)												
X, мас. %	60,56	0,11	22,66	1,76	0,02	1,18	5,89	5,86	0,38	1386	34,95	11,54
σ, мас. %	9,32	0,1	5,76	1,07	0,01	0,95	2,98	1,8	0,34	456	17,47	15,67
V, %	15,39	90,91	25,42	60,80	50,00	80,51	50,59	30,72	89,47	32,90	49,99	135,79
Черноисточинская ПП-серия – нормированные составы (52 анализа)												
X, мас. %	0,77	3,99	1,55	1,56	2,53	2,85	2,72	0,96	0,72	—	—	—
σ, мас. %	0,079	1,925	0,179	0,524	0,953	1,095	0,489	0,103	0,316	—	—	—
V, %	10,26	48,25	11,55	33,59	37,67	38,42	17,98	10,73	43,89	—	—	—
Качканарская ПП-серия – нормированные составы (49 анализов)												
X, мас. %	0,82	0,88	1,58	0,62	0,82	2,19	2,05	1,15	0,08	—	—	—
σ, мас. %	0,126	0,837	0,402	0,373	0,621	1,755	1,0375	0,353	0,06	—	—	—
V, %	15,37	95,11	25,44	60,16	75,73	80,14	50,61	30,70	75,00	—	—	—

Примечание. X – среднее (мас. %); σ – стандартное отклонение (мас. %); V – коэффициент вариации (%). FeO* – суммарное содержание железа; содержания Sr, г/т; Pl_N – состав нормативного плагиоклаза (мол. % An); Qu – количество нормативного кварца (мас. %).

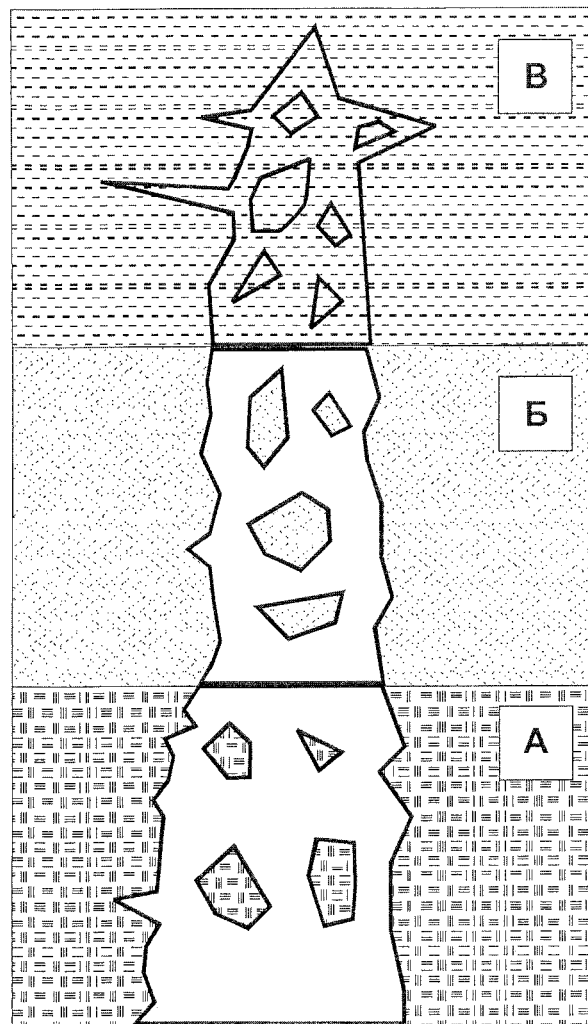
речь также о привносе Al₂O₃ (1,5). Суммарное железо FeO* и MnO ведут себя по-разному (в первом случае 1,6 и 2,5, во втором 0,6 и 0,8). Поведение щелочей различно: содержания Na₂O мало изменяются (0,96 и 1,15); K₂O, по-видимому, в обоих случаях определено выносятся (0,7 и 0,1). Наиболее резко отличие двух ареалов по TiO₂: в Качканарском имеет место небольшой вынос (0,9), в Черноисточинском – безусловно большой привнос (4,0). Последний находит подтверждение в необычном обилии сфена в жильных породах. Главная тенденция хорошо объясняется биметасоматическим обменом между жилами, исходно богатыми свободной SiO₂, и матрицей, недосыщенной SiO₂, но обогащенной фермическими компонентами.

Труднее объяснить привнос Al₂O₃ в Качканарском ареале, где пироксенитовая матрица бедна этим компонентом, хотя для данного случая десиликация как раз наиболее вероятна.

Модель образования жильной ПП-серии. Все возможные соотношения твердой и горячей (около 700°C, т.е. ниже температуры плагиогранитного солидуса) габбро-гипербазитовой матрицы, плагиогранитной магмы и водного флюида можно описать тремя предельными случаями (рис. 10). Плагиогранитная жидкость, возникшая в результате гранитизации и селективного плавления габбрового субстрата в корневой области глубинной зоны – места тектоно-метаморфической эволюции Платиноносного пояса [Ефимов, 1999], – могла внедряться на более высо-

Рис. 10. Схема соотношений плагиигранита с габбро-гипербазитовой матрицей в различных условиях.

А – внедрение дайки плагиигранита в «сухую» матрицу, сопровождаемое ничтожными по масштабам реакционными явлениями. Б – внедрение несколько позднее гидратации, т.е. при дефиците водного флюида; реакционными явления ничтожны. В – внедрение плагиигранита в область метаморфизма. Затвердевший плагиигранит при избытке водного флюида реагирует с матрицей, десилицируясь в разной степени, вплоть до полного исчезновения кварца и даже до появления нефелина. Матрица, жилы и ксенолиты составляют единое термодинамическое целое, однако при этом сохраняется реликтовая картина магматического внедрения.



кие уровни, выполняя полости растяжения в твердой габбро-гипербазитовой матрице:

1. В участках матрицы, непроницаемые для водного флюида. Критерий случая – дайки плагиигранита в любых «сухих» (без роговой обманки) габбро, сопровождаемые ничтожными по масштабам реакционными явлениями.

2. Несколько позднее гидратации, т.е. при дефиците водного флюида. Критерий – дайки плагиигранита в роговообманковых габбро, также с ничтожными по масштабам реакционными явлениями.

3. Во время гидратации, непосредственно в ареалы метаморфизма. Здесь при избытке водного флюида, способствующего химическому обмену, затвердевший плагиигранит реагирует с матрицей, десилицируясь в разной степени (очень высокий коэффициент вариации нормативного кварца в жильной серии, – см. табл. 3), вплоть до полного исчезновения кварца и даже до появления нефелина. Жилы обогащаются компонентами матрицы, в первую очередь Са и Mg (что выражается, в частности, в существовании ряда плагииоклаза от An_{20} до An_{60} в ПП-серии и в местном обогащении роговой обманкой). Габбровая матрица обнаруживает признаки химического обмена с плагиигранитом – падение основности плагииоклаза от An_{90} до An_{35} , появление нормативного кварца (возможно, впрочем, что тенденция гранитизации всей массы габбро связана в большей степени не непосредственно обменом с жилами, а с особенностями состава флюида). Критерий данного случая – плагииоклазитовый штокверк в роговообманко-

вых габбро, изофациальный с последними, запечатленный в Черноисточинском ареале. Качканарский плагииоклазитовый штокверк – тот же 3-й случай, однако здесь минеральная ассоциация пироксенита, куда его химизм не изменен реакцией с жильным материалом, устойчива в присутствии воды.

Заключение

Предлагаемая модель петрогенезиса плагииоклазит-плагиигранитной серии объясняет все особенности Черноисточинского ареала, а также разную степень десиликации плагиигранита, выражающуюся в существовании непрерывного химического ряда от плагиигранита до плагииоклазита. «Анортозит-плагиигранитная формация» Г.Б. Ферштатера и др. [1998] получает гораздо более простое и естественное, согласующееся с фактами и экспериментальными данными, объяснение, не требующее умозри-

тельных натяжек типа «анатексиса габбро в зоне палеосубдукции», выплавления и последующей дифференциации гипотетической «анортозитовой» (плагиоклазитовой) магмы. Модель разрешает кажущееся непреодолимым упомянутое противоречие между полевыми наблюдениями и петрологическими ограничениями, которое невозможно игнорировать, и подчеркивает связь плагиоклазит-плагиогранитной серии с событием позднего тектонического растяжения, водного метаморфизма и гранитообразования в истории Платиноносного пояса. Модель требует, разумеется, уточнений по части механизма химического обмена между габбро-гипербазитовой матрицей и плагиогранитным протолитом.

Автор выражает признательность кандидату геолого-минералогических наук В.И. Маекову, принимавшему участие в полевых работах, и В.П. Кавериной за помощь в лабораторной обработке материала

Список литературы

Андреева Е.Д. Аплитовые породы в пироксенитах горы Синея (Средний Урал) // Вопросы магматизма Урала. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 92–108.

Борисенко Л.Ф. Редкие и малые элементы в гипербазитах Урала. М.: Наука, 1966. 224 с.

Боуэн Н.Л. Эволюция изверженных пород. М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1934. 324 с.

Высоцкий Н.К. Месторождения платины Исковского и Нижнетагильского районов на Урале. СПб. 1913. 694 с. (Тр. Геол. Ком. Нов. сер. № 62).

Грин Т.Х. Экспериментальное исследование генезиса анортозитов при высоких давлениях // Петрология верхней мантии. М.: Мир, 1968. С. 228–255.

Ефимов А.А. Платиноносный пояс Урала: тектоно-метаморфическая история древней глубинной зоны, записанная в ее фрагментах // Отечеств. геология. 1999. № 3. С. 31–39.

Ефимов А.А., Ефимова Л.П. Кытлымский платиноносный массив. М.: Недра, 1967а. 336 с.

Ефимов А.А., Ефимова Л.П. Генетическое значение степени равновесности габброидов // Докл. АН СССР. 1967б. Т. 175. № 1. С. 182–185.

Ефимов А.А., Потапова Т.А. О первичном веществе жадеитовых пород Полярного Урала // Метаморфогенная металлогения Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1992. С. 128–136.

Ефимов А.А., Потапова Т.А. Жильная плагиоклазитовая серия Качканарского массива (Урал) – продукт десиликации плагиогранитного штокверка // Региональная геология и металлогения. 2002. № 15. С. 45–57.

Ефимов А.А., Потапова Т.А., Берлибле Д.Г. Химическая эволюция пироксенов уральских габбро: роль барического, термического, кислородного и химического факторов // Геохимия. 1999. № 5. С. 466–485.

Заварицкий А.Н. Коренные месторождения платины на Урале // Мат. по общей и прикл. геологии. Вып. 108. Л.: Геол. Ком., 1928. 56 с.

Йодер Г.С., Тилли К.Э. Происхождение базальтовых магм (Результаты экспериментального изучения природных образований и синтетических систем). М.: Мир, 1965. 248 с.

Решитько В.А. О значении жильных пород для определения уровней эрозионных срезов массивов Платиноносного пояса Урала // Докл. АН СССР. 1962. Т. 142. № 4. С. 906–908.

Розенбуш Г. Описательная петрография. М.: ОНТИ НКТП СССР, 1934. 720 с.

Ферштатер Г.Б. Гранитоиды в гипербазит-габбровых массивах Урала // Магматические и метаморфические породы океанической коры. М.: Наука, 1983. С. 94–110.

Ферштатер Г.Б. Структурно-формационная зональность Урала и магматизм // Геотектоника. 1992. № 6. С. 3–17.

Ферштатер Г.Б., Беа Ф. Геохимическая типизация уральских офиолитов // Геохимия. 1996. № 3. С. 195–218.

Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Бородина Н.С. Геохимия и петрогенезис анортозит-плагиогранитной серии Черноисточинского массива (Платиноносный пояс Урала) // Ежегодник-1994 ИГГ. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. С. 148–151.

Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Бородина Н.С., Монтеро М.П. Анатексис базитов в зоне палеосубдукции и происхождение анортозит-плагиогранитной серии Платиноносного пояса Урала // Геохимия. 1998. № 8. С. 768–781.

Ферштатер Г.Б., Малахова Л.В., Бородина Н.С. Гранитоиды в гипербазит-габбровых массивах Платиноносного пояса Урала // Вопросы петрологии Урала (магматизм, метаморфизм, литология). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 14–47.

Ферштатер Г.Б., Малахова Л.В., Бородина Н.С. и др. Эвгеосинклинальные габбро-гранитоидные серии. М.: Наука, 1984. 264 с.

Фоминых В.Г., Краева Ю.П., Ларина Н.В. Петрология и рудогенезис Качканарского массива. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 181 с.

Ходоревская Л.И., Жариков В.А. Экспериментальное изучение плавления амфиболитов в связи с проблемами генезиса тоналит-трондьемитовых магматических серий // Экспериментальное и теор. моделирование процессов минералообразования. М.: Наука, 1998. С. 11–31.

Baker D.R., Eggler D.H. Compositions of anhydrous and hydrous melt coexisting with

plagioclase, augite, and olivine or low-Ca pyroxene from 1 atm to 8 kbar: Application to the Aleutian volcanic center Atka // Amer. Mineral. 1987. Vol. 72. P. 12–28.

Beard J.S., Lofgren G.E. Effect of water on the composition of partial melts of greenstone and amphibolite // Science. 1989. Vol. 244. P. 195–197.

Beard J.S., Lofgren G.E. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 7 kbar // J. Petrol. 1991. Vol. 32. P. 356–401.

Duparc L., Jerchoff S. Sur les plagiaplites du Koswinsky // Compt. Rend. Acad. Sc. Paris. 1902 (Цит. по [Duparc, Tikonowitch, 1920]).

Duparc L., Tikonowitch M.N. Le platine et les gites platiniferes de l'Oural et du Monde. Geneve: Sonor. 1920. 547 p.

Ellis D.J., Thompson A.B. Subsolidus and partial melting reactions in the quartz-excess $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{H}_2\text{O}$ system under water-excess and water-deficient conditions to 10 kbars: some

implications for the origin of peraluminous melts from mafic rocks // J. Petrol. 1986. Vol. 27. P. 91–121.

Helz R.T. Phase relations of basalts and their melting ranges at $P(\text{H}_2\text{O}) = 5$ kbar. Part II. Melt compositions // J. Petrol. 1976. Vol. 17. P. 139–193.

Johnston A.D. Anhydrous P-T phase relations of near-primary high-alumina basalt from the South Sandwich Islands // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. Vol. 92. P. 368–382.

Patino Douce A.E., Beard J.S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar // J. Petrol. 1995. Vol. 36. P. 707–738.

Spulber S.D., Rutherford M.J. The origin of rhyolite and plagiogranite in oceanic crust: An experimental study // J. Petrol. 1983. Vol. 24. P. 1–25.

Tuttle O.F., Bowen N.L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ // Geol. Soc. Amer. Mem., 74. 1958. 158 p.

Рецензенты доктор геол.-мин. наук Ф.П. Леснов, академик РАН В.И. Коваленко