

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Т. Ю. БАЗАРОВА

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
УСЛОВИЯ
ФОРМИРОВАНИЯ
НЕКОТОРЫХ
НЕФЕЛИНСОДЕРЖАЩИХ
ПОРОД



Издательство «Наука»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Т. Ю. БАЗАРОВА

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ
УСЛОВИЯ
ФОРМИРОВАНИЯ
НЕКОТОРЫХ
НЕФЕЛИНСОДЕРЖАЩИХ
ПОРОД



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1969

Термодинамические условия формирования некоторых нефелинсодержащих пород. Базарова Т. Ю. Изд-во «Наука» 1969 г.

В работе приводятся основные физико-химические параметры процессов кристаллизации нефелинсодержащих пород некоторых районов СССР. Многие данные получены впервые в практике минералогических исследований и приводятся на основании детального минералотермометрического изучения породообразующих минералов, проведенного новейшими минералотермометрическими методами.

Табл. 12. Илл. 36. Библ. 167 назв.

Ответственный редактор
доктор геол.-мин. наук В. П. КОСТЮК

Выяснение условий формирования щелочных пород (температуры, давления и состава летучих при кристаллизации) кроме теоретического представляет существенный практический интерес, обусловленный полезной минерализацией, связанной со щелочными породами (апатит, графит, минералы, содержащие Tl, Nb, Ta, Th, U и др.).

Существующие взгляды на генезис щелочных пород в настоящее время представлены двумя основными направлениями — магматическим и метасоматическим.

Происхождение одних и тех же пород часто объясняется с разных позиций. Современное состояние вопросов генезиса щелочных пород освещено в ряде работ О. А. Воробьевой (1961, 1963), Ю. М. Шейнмана и других авторов (1960, 1961).

При решении вопросов генезиса эндогенных образований в последние годы появляется тенденция к количественным оценкам физико-химических условий минералообразования. В связи с этим в литературе появилось много работ, посвященных методам выяснения температурных условий кристаллизации магматических образований (Oftedahl, 1943; Barth, 1951, 1955; Buddington, Fahey, Flisidis, 1955, 1963; Ингресон, 1958; Hamilton, 1961; Перчук, 1965 и др.).

Настоящая работа, являющаяся частью темы «Минералогия магматических и метаморфических пород Сибири», разрабатываемой в Лаборатории минералогии Института геологии и геофизики СО АН СССР (руководитель В. П. Костюк) под общим научным руководством акад. В. С. Соболева, основана на материале, полученном в процессе проведения полевых и лабораторных работ в период с 1960 по 1966 гг.

Целью работы явилось выяснение главных физико-химических параметров (температуры, давления, состава летучих), существовавших в процессе формирования некоторых щелочных пород. Получение этих данных представляет возможность мерой и числом охарактеризовать общие петрологические условия кристаллизации изучающихся пород.

В работе впервые в практике минералогических исследований для выяснения генетических вопросов формирования изучавшихся щелочных пород были использованы новейшие минералотермометрические методы, позволяющие определить основные условия минералообразования.

Объектами исследований явились породообразующие минералы нефелинсодержащих пород Ботокольского и Нюрганского щелочных массивов (Восточный Саян).

Для сопоставлений были привлечены материалы других наиболее близких по геологической обстановке (главным образом связанных с гранитоидами) щелочных массивов, любезно предоставленные Я. М. Фейгиным (Ловозерский массив), В. Г. Кушевым (Восточное Приазовье) и музеем ИГиГ СО АН СССР (Урал, Хибини).

Впервые в практике минералотермометрических исследований в минералах изверженных горных пород были обнаружены высокотемпературные газо-жидкие включения и разработаны приемы их изучения: определение температуры гомогенизации (Керкис, Костюк, 1963); обоснована первичность высокотемпературных включений и отсутствие явлений расшнуровки; разработаны приемы определения концентраций солей в растворах высокотемпературных включений и т. д.

Минералотермометрическими методами детально исследовались нефелин, пироксен, кальцит, канкринит, гранат и волластонит пород Ботокольского щелочного массива (Восточный Саян); нефелин нефелиновых сиенитов Нюрганского щелочного массива (Восточный Саян); нефелин и эгирин пород Ловозерского щелочного массива; нефелин из пород Хибинского щелочного массива; нефелин, пироксен, амфибол, канкринит, содалит, кальцит, пирохлор из пород Уральского миаскитового комплекса; нефелин, содалит и пироксен из щелочных пород Восточного Приазовья.

Выполненные экспериментальные работы по изучению минералов щелочных пород различных районов включают:

1. Определение температур гомогенизации включений — около 4500 двойных определений (всего проведено около 12 тыс. определений).

2. Определение давления в момент гомогенизации включений (22 определения).

3. Определение концентраций солей в растворах во включениях на установке для замораживания включений (22 определения).

4. Анализ водных вытяжек (9 анализов).

5. Определение состава газовой фазы во включениях методом газового анализа индивидуальных включений (9 анализов).

6. Определение частичного состава (CO_2) газовой фазы включений (21 анализ).

Полученные результаты сопоставлялись с данными экспериментального изучения подобных силикатных систем и минералого-петрографическими исследованиями щелочных пород Ботокольского и Нюрганского массивов.

Монография состоит из трех основных частей. В первой части кратко рассматриваются вопросы геологического строения районов развития щелочных пород, минералого-петрографическая и генетическая характеристики изучавшихся пород, приводящиеся нами главным образом по литературным данным.

Во второй части изложены применявшиеся новые методы, приемы и техника исследований.

Третья часть содержит результаты экспериментальных исследований и теоретические выводы.

Автор выражает глубокую благодарность акад. В. С. Соболеву и доктору геол.-мин. наук В. П. Костюку за ряд ценных указаний и советов; сотрудникам Лаборатории минералообразующих растворов — Л. Ш. Базарову, Н. А. Шугуровой, И. Т. Бакуменко, Ю. А. Долгову и другим за ряд ценных консультаций по вопросам техники минералотермометрических экспериментов.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ
РАЙОНОВ РАЗВИТИЯ
ИЗУЧАВШИХСЯ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД

БОТОГОЛЬСКИЙ И НЮРГАНСКИЙ ЩЕЛОЧНЫЕ
МАССИВЫ

(восточная часть Восточного Саяна)

Геологическое строение района и положение изверженных пород в общих стратиграфических разрезах освещено в работах И. А. Молчанова (1934), В. А. Обручева (1939), С. В. Обручева (1942, 1949), Н. С. Ильиной (1945), М. Л. Лурье и В. В. Обручева (1950, 1952), В. П. Арсентьева (1960), А. Л. Додина и В. П. Гурьяновой (1960), А. Л. Додина (1961), Т. И. Ивановой (1961), А. Д. Смирнова и др. (1963) и ряда других исследователей.

Изучению изверженных пород восточной части Восточного Саяна посвящены работы А. Н. Сулоева (1960), И. Н. Крылова и др. (1962), А. Д. Смирнова и В. В. Булдакова (1962), А. П. Лебедева и О. А. Богатикова (1963), В. П. Костюка (1964) и многих других авторов.

Геологическая характеристика района приводится нами по данным перечисленных исследователей.

Широкое распространение докембрийских метаморфических толщ, сложность строения региона и отсутствие полных стратиграфических разрезов существенно затрудняют определение возраста интрузий и получение представлений о развитии магматизма.

Возраст щелочных пород Восточного Саяна принимается почти всеми исследователями как палеозойский (даже среднепалеозойский). О возрасте Ботогольского щелочного массива также имеется несколько представлений. Б. М. Куплетский (1925₁) генетически связывает щелочные породы массива с гранитами Буруктуйского гольца. Н. А. Флоренсов (1947), проводивший детальные исследования Ботогольского щелочного мас-

сива, считает возраст массива позднекаледонским (нижне- или среднедевонским) на основании следующих фактов: 1) бото-гольские сиениты и граниты прорывают протерозойские метаморфические породы; 2) щелочные сиениты левобережья Урика, которые автор считает «безусловно одновозрастными с бото-гольскими», прорывают граниты Буруктуйского массива, следовательно, ботогольские щелочные породы моложе гранитов; 3) ботогольский массив не может иметь протерозойского и даже раннекаледонского возраста еще и потому, что каледонский этап в Восточном Саяне проявился в конце силура и в девоне.

А. Л. Додин и В. Н. Гурьянова (1960) выделяют в верхней части палеозойского разреза ряд интрузивных комплексов, в том числе огнитский и зиминский.

В зиминский комплекс включены нефелиновые сиениты и карбонатиты р. Зимы. Упоминаний о породах центральной части Восточного Саяна встречено не было, но на схематической карте Ботогольский массив включен в зиминский комплекс. Очень похожую схему дает Т. Н. Иванова (1961). Ею выделяются огнитский интрузивный комплекс (нижний девон) и зиминский (верхний палеозой, нижний мезозой). Щелочные габброиды, уртиты и карбонатиты отнесены к зиминскому комплексу.

В. П. Арсентьев (1960), ссылаясь на Ф. К. Волколакова, предлагает включить нефелиновые сиениты Ботогола завершающей фазой в так называемый сархойский интрузивный комплекс, куда помещены гранодиориты, граниты, граносиениты и сиениты.

Комплекс девонских кислых и щелочных гранитоидов, по А. Н. Сулоеву (1960), является результатом многофазового процесса формирования, где в первую фазу образовались биотитовые порфириовидные граниты и адамеллиты, во вторую — лейкократовые граниты, граносиениты и субщелочные граниты и сиениты, а третья фаза, по А. Н. Сулоеву, формируется в три этапа — подфазы. В первую подфазу образовались нормальные пироксеновые сиениты, во вторую — щелочные и нефелиновые пироксеновые и рибекитовые сиениты и, наконец, в последнюю подфазу — нефелиновые сиениты и ультращелочные породы.

Л. П. Рик (1961) придерживается совершенно других взглядов на место щелочных пород восточной части Восточного Саяна. Почти все магматические образования, которые А. Н. Сулоев отнес к девонским, у Л. П. Рика объединены в единый огнитский комплекс. Формирование этого комплекса связывается с последним этапом каледонской складчатости или началом герцинской. Автор связывает огнитский комплекс Восточного Саяна с сютхольским интрузивным комплексом Восточной Тувы, где так же, как и в Восточном Саяне, допускается генетическая связь щелочных гранитов сангиленского комплекса с девонскими гранитами.

По И. Н. Крылову и др. (1962), породы Ботогольского щелочного массива выделяются из палеозойских интрузивных образований в самостоятельный Ботогольский комплекс. Этот комплекс на стратиграфической схеме расположен между более древним огнитским и самым молодым белозиминским интрузивными комплексами. Ботогольский комплекс связывается с завершающими этапами каледонской складчатости. Сархойский интрузивный комплекс И. Н. Крылов помещает в самых низах нижнего палеозоя.

А. Д. Смирнов и В. В. Булдаков (1962) рассматривают главную массу девонских граносиенитов и сиенитов Восточного Саяна вместе со щелочными породами.

Наиболее новые данные о возрасте щелочных пород Восточного Саяна приведены В. М. Клярским и В. П. Костюком (1965):

Нефелиновый сиенит Ботогола . . .	521 млн. лет		
» » »	492	»	»
» » хр. Нюрган	460	»	»
Щелочноземельный сиенит Сорокских гольцов	524	»	»
Гранит гольца Гранитного	488	»	»

Полученный абсолютный возраст позволяет отнести щелочные породы Окинской структурной зоны к верхнему кембрию—ордовики.

В районе Урик-Окинского междуречья широко распространены палеозойские гранитоиды, локализующиеся в виде вытянутой в северо-западном направлении полосы длиной 130 км, шириной около 50 км. Вмещающими породами являются преимущественно известняки и метаморфические сланцы протерозойского возраста: V_1 — филлитовая и V_2 — известняковая свиты (по С. В. Обручеву, 1942); монгошинская—известняковая и окинская—сланцево-песчаниковая свиты (по В. П. Арсентьеву, 1960); гарганский комплекс и комплекс зеленых сланцев (по А. Д. Смирнову и В. В. Булдакову, 1962).

По мнению С. В. Обручева (1942), описываемый район в структурном отношении представляет собой опрокинутую на юго-запад синклиналиную структуру. Окинский синклинорий выделяют А. Д. Смирнов и др. (1963).

А. Л. Додин выделяет крупный Окинский антиклинорий, ядро которого слагают метаморфические сланцы и песчаники, а крылья — монгошинские известняки (Додин, 1961).

Ботогольский щелочной массив располагается в юго-восточной оконечности Окинской структуры; в этой же части структуры по левобережью Урика находятся более мелкие массивы щелочных сиенитов и нордмаркитов. К северу и северо-западу от

Ботогола в Сорокских и Шебеликских гольцах расположены крупные массивы щелочноземельных сиенитов. На западе в широтном направлении вытянуты граносиениты хр. Каландарашвили.

Щелочные и нефелиновые сиениты хр. Нюрган расположены среди граносиенитов по водоразделу Бурят-Гола и Сенцы и в структурном отношении приурочены к северо-западной оконечности Окинской структуры.

Вмещающими породами для ботогольских щелочных и нефелиновых сиенитов являются протерозойские известняки, чередующиеся с мощными прослоями метаморфических сланцев. Контакты изверженных пород с известняками имеют сложные контуры. Среди нефелиновых и щелочных сиенитов сохранилось большое количество ксенолитов известняков (остатки кровли интрузива), размеры которых колеблются от нескольких десятков метров (огромные блоки и клинья) до нескольких сантиметров.

Геологическое строение района Нюрганского щелочного массива в главных деталях аналогично строению района Ботогольского массива. Эти участки находятся на противоположных концах Окинской структуры, сложенной преимущественно известняками монгошинской свиты, и отстоят друг от друга на расстоянии более 100 км.

ЛОВОЗЕРСКИЙ ШЕЛОЧНОЙ МАССИВ

Ловозерский массив является одним из крупнейших представителей герцинского комплекса щелочных пород Кольского полуострова. Он расположен в зоне тектонического сочленения протерозойских образований (свита имандра-варзуга), которые слагают синклиорий, с комплексом гранито-гнейсов архея.

Изучению Ловозерского щелочного массива в разные времена уделяли внимание многие исследователи: Рамзай, А. Е. Ферсман, О. А. Воробьева, В. И. Герасимовский, Б. М. Куплетский, И. Д. Борнеман, Е. Е. Костылева, В. И. Влодавец, Н. А. Елисеев, К. А. Власов, М. В. Кузьменко, Е. М. Еськова и многие другие.

Именно этим исследователям мы обязаны в настоящее время представлениями о геологическом строении, минералогическо-петрографических и геохимических особенностях массива.

Мы ограничиваемся минимально необходимой характеристикой особенностей геологического строения массива, приведенной по работе К. А. Власова, М. В. Кузьменко, Е. М. Еськовой (1959).

Площадь, занимаемая Ловозерским щелочным массивом, составляет около 650 км². Это сложное интрузивное тело,

являющееся классическим примером дифференцированных интрузий, сформировалось в несколько интрузивных фаз. Возраст массива соответствует верхнему девону или нижнему карбону (Герлинг, 1941). В строении массива участвуют четыре комплекса: 1) комплекс эвдиалитовых луавритов, 2) дифференцированный комплекс, 3) комплекс пойкилитовых сиенитов и 4) комплекс жильных пород.

Первый комплекс гипсометрически слагает верхнюю часть массива и составляет более 30% объема изученной до глубины 1400 м части массива. Мощность этого комплекса, по данным К. А. Власова и др. (1959), колеблется от 150 м в восточной до 300—500 м в западной части массива. Комплекс представлен эвдиалитовыми луавритами, слагающими 90% объема, порфировидными породами, составляющими около 10% объема массива и занимающими ничтожный удельный вес жильными эвдиалитовыми луавритами (Елисеев, 1938) и эвдиалититами. Дифференцированный комплекс слагает нижнюю часть массива и составляет около 65% его объема. Средняя мощность комплекса превышает 1650 м.

Породы дифференцированного комплекса отличаются слоистым строением, выраженным чередованием фойяитов, уртитов, луавритов и некоторых других промежуточных между ними (по соотношению главных породообразующих минералов) пород.

Комплексу пойкилитовых сиенитов слагает около 5% объема массива. Породы этого комплекса распространены на юго-востоке, северо-востоке и в центральной части массива, где они прорывают породы комплекса эвдиалитовых луавритов и дифференцированного комплекса. Пойкилитовые сиениты образуют небольшие тела неправильной иногда пластообразной или линзовидной формы и жилы, не превышающие по мощности 5 м.

Жильный комплекс пород Ловозерского массива представлен очень редко встречающимися мончикитами, тингуанитами, нефелиновыми базальтами, фурчитами, шонкинитами и др. (Елисеев и др., 1938).

Пегматиты в Ловозерском щелочном массиве распространены широко и встречаются во всех комплексах пород в виде жил, неправильной формы небольших тел и хорошо прослеживающихся по простирацию пегматитовых горизонтов.

Вмещающие породы представлены: гранито-гнейсами, распространяемыми наиболее широко; биотит-плагиоклазовыми, гранат-биотитовыми силлиманитовыми и амфиболовыми гнейсами; мигматитами, амфиболитами, перидотитами, пироксенитами, горнблендитами и амфиболовыми габбро архейского возраста (в соответствии с их распространенностью). Контакт щелочных пород с архейскими — интрузивный.

Палеозойские породы представлены довольно пестро. Это авгитовые, эсекситовые, пикритовые порфириты, щелочные

Таблица 1

Стадия	Б. И. Герасимовский (1944)	Н. А. Елисеев (1938)	О. А. Воробьева (1937)
IV	Комплекс молодых жильных пород	Комплекс молодых жильных пород (мончикиты, тингуаниты, реже нефелиновые базальты, шонкиниты и фурчиты)	Щелочные базальты, мончикиты и другие молодые жильные породы
III	1в. Тавиты и пойкилитовые содалитовые сиениты 1б. Порфиroidные луавриты 1а. Эвдиалитовые луавриты	Комплекс эвдиалитовых луавритов и порфиroidных луавритов	Тавиты 1а. Пойкилитовые и равномернозернистые нефелино-содалитовые породы, уртиты, фойяит-аплиты 1. Фойяиты (дитриты), 64% площади распространения
II	1б. Фойяиты и уртиты 1а. Эгириновые луавриты	Дифференцированный комплекс фойяит — уртит — луавритов	Равномернозернистые и порфиroidные эгириновые (слодяные) нефелиновые сиениты, 1,8 площади распространения
I	Комплекс равномернозернистых и порфиroidных эгириновых (слодяных) нефелиновых сиенитов, фойяитов и пойкилитовых нефелиновых сиенитов	Комплекс мелкозернистых нефелиновых и щелочных сиенитов, пойкилитовых нефелиновых сиенитов и тавитов, уртитов, тавитов и фойяитов	1а. Комплекс эвдиалитовых луавритов и их жильные породы (верхняя часть массива), 49,1% площади распространения 1. Эгириновые луавриты (нижняя часть массива), 42,7% площади распространения

трахитовые и фонолитовые порфиры и их туфы; туфогенные, глинистые и мергелистые сланцы, кварциты и песчаники (Елисеев, 1938). Находки флоры (Криштофович, 1937) в туфовых сланцах подтвердили для эффузивно-осадочной толщи девонский возраст. Нефелиновые сиениты имеют четкие контакты с эффузивно-осадочным комплексом. О. А. Воробьева (1937), Н. А. Елисеев (1938) и В. И. Герасимовский (1944), наиболее подробно изучавшие породы Ловозерского щелочного массива и взаимоотношения различных интрузивных комплексов, считают, что массив сформировался в четыре интрузивных этапа, но возрастные отношения между тремя первыми комплексами, а также отношения между породами внутри каждого комплекса каждый из этих авторов решает по-разному. Ниже (табл. 1) приведены схемы образования Ловозерского массива,

предлагаемые О. А. Воробьевой, И. А. Елисеевым и В. И. Герасимовским (цитируется по К. А. Власову, М. В. Кузьменко, Е. М. Еськовой, 1959).

УРАЛЬСКИЙ МИАСКИТОВЫЙ МАССИВ

Геологическое строение района развития Уральского миаскитового массива приведено в ряде работ известных исследователей Урала: А. Н. Заварицкий (1926—1927), Д. С. Белянкин (1926, 1928, 1929), Б. М. Куплетский (1937), Е. А. Кузнецов (1930), О. А. Воробьева (1947) и другие,— поэтому в нашей работе приводится лишь очень краткая геолого-структурная характеристика района, базирующаяся в основном на работах А. Н. Заварицкого (1926—1927) и Д. С. Белянкина (1926).

Уральский миаскитовый массив вытянут в меридиональном направлении в виде узкой полосы длиной около 135 км. Миаскиты слагают центральную часть интрузивного комплекса, сменяющуюся с обеих сторон (на западе и востоке) эгирин-авгитовыми сиенитами, затем роговообманковыми гранитами и далее гранито-гнейсами.

Вмещающие комплекс породы представлены метаморфической толщей слюдяных сланцев, тонкослоистых гнейсов с линзами плагиоклазовых амфиболитов, кремнистыми сланцами и известняками (в подчиненном количестве) (Заварицкий, 1926—1927).

Миаскиты слагают ядро куполообразных окончаний (Ильменские и Вишневые горы) асимметричной антиклинальной складки (Заварицкий, 1926—1927; Белянкин, 1926).

Возраст описываемого магматического комплекса — посленижнекаменноугольный (Заварицкий, 1926—1927).

ОКТЯБРЬСКИЙ МАССИВ

(Восточное Приазовье)

Геологическому и минералого-петрографическому описанию этого района посвящены работы многих авторов (Морозевич, 1898^{1,2}, 1901; Morozewicz, 1930; Айнберг, 1933; Лучицкий, 1934; Куплетский, 1937; Царовский, 1957 и др.). В настоящее время вопросы петрологии и генезиса протерозойских щелочных пород Восточного Приазовья наиболее полно освещены в большой работе Н. А. Елисеева, В. Г. Кушева и Д. П. Виноградова (1965), материалы которой и были нами использованы для геологической и минералого-петрографической характеристики массива.

Щелочной Октябрьский массив расположен в верховьях р. Восточный Кальчик и балки Вали-Тарама, где он занимает

площадь около 100 м². Основная часть массива сложена сиенитами (кварцсодержащими, пироксеновыми и пироксенсодержащими). На долю собственно щелочных пород (щелочных и нефелиновых сиенитов, мариуполитов) приходится небольшие участки. Возраст пород Октябрьского массива считается протерозойским (Елисеев, Кушев и др., 1965).

Занимающие большую часть массива нормальные щелочно-земельные сиениты располагаются по его периферии. Они имеют секущие интрузивные контакты с вмещающей гнейсовой толщей архейского возраста.

Щелочные сиениты расположены во внутренней части массива, но нигде не обнаруживают заведомо интрузивных контактов с сиенитами периферии. По различиям в ориентировке трахитоидности они рассматриваются «как результат самостоятельной интрузивной фазы» (Елисеев, Кушев, Виноградов, 1965).

По периферии поля щелочных сиенитов главным образом в северо-восточной части массива расположены одно крупное и несколько мелких тел основных и ультраосновных пород (габбро, пироксениты и перидотиты). Такое пространственное расположение тел основных и ультраосновных пород одно время служило основанием для предположения о том, что эти породы представляли собой самую раннюю интрузивную фазу и слагали плутон овальной формы. Затем основная масса этого плутона была ассимилирована при последующем внедрении расплава кислого состава. В результате ассимиляции возникли гибридные породы — сиениты (Царовский, 1960). В литературе нигде нет указаний на наличие интрузивных контактов основных пород с сиенитами и гранитами. Описаны только тектонические контакты.

Щелочные сиениты имеют тектонические контакты и с основными и ультраосновными породами. Но жильные тела щелочных сиенит-аплитов и щелочных сиенит-пегматитов секут основные породы преимущественно по **системам трещин, соответствующим направлению трахитоидности.**

Нефелиновые сиениты (фойяиты) слагают в центре массива довольно крупное тело (Елисеев, Кушев и др., 1965), имеющее форму открытой к северо-востоку подковы. Там, где вышеуказанным авторам удалось проследить смену нефелиновых сиенитов щелочными, наблюдался постепенный переход.

По данным В. Г. Кушева, известны и несомненно интрузивные тела нефелиновых сиенитов, имеющие секущие контакты с вмещающими породами, но это типичные дайки небольшой мощности (20—50 см).

Особое место в строении массива занимают породы, объединяемые в литературе под названием мариуполитов. Эти породы наиболее широко развиты на северо-востоке и на юге массива. В первом случае они расположены среди основных и ультраос-

новых пород, во втором — среди нефелиновых сиенитов. Породы, расположенные на юге массива, «по структурно-текстурным особенностям» близки к породам мариуполитовой группы, но отличаются существенным количеством микроклина (Елисеев и др., 1965).

В настоящее время возрастная последовательность пород протерозойского интрузивного комплекса Восточного Приазовья представляется следующей: ультраосновные и основные породы — биотитовые граниты — пироксен-амфиболовые граниты — щелочные сиениты — фойяиты — мариуполиты.

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧАВШИХСЯ ПОРОД

БОТОГОЛЬСКИЙ И НЮРГАНСКИЙ ЩЕЛОЧНЫЕ МАССИВЫ

Ботогольское месторождение графита, открытое в Восточном Саяне Алибером, известно уже более ста лет. Первые описания минерального состава вмещающих графит пород были проведены в конце девятнадцатого (Ячевский, 1899) — начале двадцатого столетия (Заварицкий, 1907). Подробное описание щелочных пород Ботогольского массива и отдельных породообразующих минералов сделано Б. А. Куплетским (1925_{1,2}). К этому же времени относится работа Е. Е. Костылевой и А. Н. Лабунцова, в которой приведено описание минералов массива (без каких-либо сведений об их химизме и кристаллооптических данных). В работах Б. П. Некрасова (1928) и И. И. Орешкина (1931) содержатся лишь самые краткие сведения о составах некоторых минералов, полученных по кристаллооптическим константам. Важные сведения об особенностях химизма породообразующих минералов и генезисе щелочных пород Ботогольского массива имеются в работе В. С. Соболева (1947).

Расширенная минералого-петрографическая и генетическая характеристика щелочных пород восточной части Восточного Саяна дана В. П. Костюком (Костюк, Базарова, 1966). Ссылаясь на упомянутые выше работы, нами приводится лишь краткое минералого-петрографическое описание Ботогольского и Нюрганского щелочных массивов, сделанное по данным В. П. Костюка.

Интрузивные породы Ботогольского массива занимают площадь около 10 км². Массив вытянут в субмеридиональном на-

правлении. Периферическая его часть сложена в основном щелочными сиенитами, а центральная — нефелиновыми сиенитами. Непосредственный контакт между вмещающими известняками и нефелиновыми сиенитами наблюдается лишь на северо-западной и юго-восточной оконечностях массива (рис. 1).

Среди пород Ботогольского массива наибольшим распространением пользуются щелочные и нефелиновые сиениты. Для этих пород определяющим фемическим минералом (за небольшим исключением некоторых разновидностей) является моноклинный пироксен геденбергитового состава с очень небольшой примесью диопсидового и эгиринового компонентов.

Щелочные сиениты среднезернистые, преимущественно трахитоидной текстуры.

Нефелиновые сиениты, как правило, массивные, нередко встречаются участки, имеющие трахитоидную текстуру (на юге массива).

Главные породообразующие минералы щелочных сиенитов представлены кали-натровым полевым шпатом и моноклинным пироксеном, иногда встречается амфибол и биотит. Амфибол обычно развивается как реакционно-магматический минерал за счет пироксена. Можно проследить все стадии такого замещения вплоть до случая, когда амфибол становится единственным темноцветным минералом. Однако чисто амфиболовые сиениты, как щелочные, так и нефелиновые, встречаются редко.

Содержание клинопироксена колеблется в широких пределах: от 15—20% в пироксен-калишпатовых разновидностях до 50—70% в пироконтактовых зонах с вмещающими известняками или крупными блоками — ксенолитами известняков. В последнем случае породы превращаются в меланократовые малиниты и даже в щелочные габброиды, по классификации И. А. Елисеева (1957).

Нефелиновые сиениты аналогичны щелочным сиенитам и отличаются от последних лишь присутствием нефелина.

Нефелин хорошо диагностируется макроскопически по довольно темно-зеленому цвету и жирному блеску на изломе. Размеры кристаллов нефелина в пегматоидных разновидностях достигают 3—5 см. Показатели его светопреломления: $Ng' = 1,537$; $Np' = 1,532$.

В шлифах кристаллы нефелина имеют округлую или полигональную формы. В породах, не подвергшихся постмагматическим извержениям, нефелин в шлифах водяно-прозрачен. Замещение канкринитом не вызывает помутнения всего зерна нефелина. Только в случаях замещения пелитом или серицитом (изредка либнеритом) нефелин совершенно теряет прозрачность, превращаясь в бурый тонкозернистый агрегат. Наряду с канкринитом, но только значительно реже по нефелину развивается синий содалит.

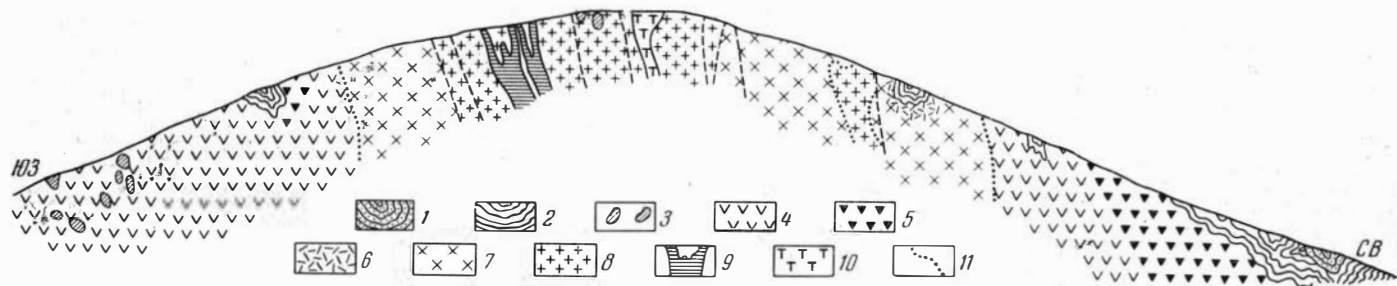


Рис. 1. Геологический разрез Ботогольского массива щелочных и нефелиновых сиенитов (по Н. А. Флоренсову, 1947)
 1—метаморфические сланцы; 2 — кристаллические известняки; 3—сиениты; 4—щелочные сиениты; 5—меланократовые щелочные сиениты; 6—скарны; 7—нефелиновые сиениты; 8—лейкократовые нефелиновые сиениты; 9—зоны мусковитизации; 10—канкринитизированные нефелиновые сиениты; 11 — дизъюнктивные нарушения

Таблица 2

Окисел	1	2	Окисел	1	2
SiO ₂	44,36	46,34	Na ₂ O	15,45	14,15
Al ₂ O ₃	33,20	30,85	K ₂ O	5,72	4,59
Fe ₂ O ₃	—	—	П. п. п.	1,03	1,34
MgO	—	—	CO ₂	—	—
CaO	0,24	1,84			
			С у м м а	100,00	99,11

Аналитик Э. С. Гулецкая.

Химический анализ ботогольских нефелинов в ассоциации с кали-натровым полевым шпатом приведен в табл. 2.

Компонентный состав нефелина приведен в табл. 3.

Между щелочными и нефелиновыми сиенитами наблюдаются постепенные переходы от пород существенно калишпатовых, где нефелин присутствует в очень небольших количествах, до настоящих уртитов и пойкилитовых ийолитов; последние, правда, не играют существенной роли в строении массива. Они встречены в северо-восточной части Ботогольского массива в виде дайки мощностью около 3 м, простирающейся в северо-восточном направлении. Эта дайка прослежена по склону гольца на расстоянии примерно 250 м.

В преобладающей массе нефелиновых сиенитов соотношение между нефелином и калишпатом близки к 1 : 1. Ранний альбит, характерный для мариуполитов и нефелиновых сиенитов некоторых других районов, отсутствует, поэтому ботогольские породы справедливее называть ювитами.

Наряду с перечисленными выше клинопироксеном, амфиболом и биотитом в нефелиновых сиенитах относительно редко присутствует существенно андрадитовый гранат.

Второстепенные минералы в щелочных и нефелиновых сиенитах представлены сфеном (часто количество его явно превышает аксессуарное), цирконом (преимущественно в лейкократовых разновидностях нефелиновых сиенитов), апатитом, сидеритом, волластонитом и кальцитом, который развит в виде пойкилитовых включений в нефелине, калишпате и клинопироксене; изредка встречается флюорит.

Таблица 3

Минерал	1	2
Нефелин . . .	73,2	72,4
Кальсилит . . .	20,0	17,4
Кварц	6,8	10,2

Вторичные минералы представлены канкринитом, содалитом, изредка мусковитом (либнеритом), развивающимся по нефелину, и альбитом, который создает венцовые структуры, развиваясь в виде узкой каймы по периферии зерен калишпата.

Довольно широко в Ботогольском массиве распространены канкринитизированные нефелиновые сиениты. Канкринит в них образует мелкие, типа розеток по форме, выделения, развивающиеся от зерен кальцита внутри нефелина; там, где происходит интенсивное замещение нефелина, канкринит уже можно различить макроскопически. И наконец, встречаются разновидности, в которых канкринит становится определяющим минералом. Обычно он не образует совершенных по форме кристаллов, но его выделения, имеющие полигональные очертания, достигают иногда 2—3 см в поперечнике. Изредка в нефелиновых сиенитах наряду с канкринитом встречается интенсивно синий содалит. В северо-западной оконечности массива встречены гранатсодержащие нефелиновые сиениты.

Необходимо отметить, что в центральной части массива примерно в широтном направлении проходит тектоническая зона, ширина которой составляет 200—250 м. В пределах этой зоны особенно интенсивно проявились относительно низкотемпературные гидротермально-метасоматические процессы (Костюк, 1964).

Для Ботогольского массива характерно отсутствие жильных пород и пегматитов. Эти образования почти не встречаются ни в пределах самого щелочного массива, ни во вмещающей его толще. Только среди нефелиновых сиенитов северного купола были обнаружены отдельные участки пегматоидного облика, по минеральному составу ничем не отличающиеся от окружающих их нефелиновых сиенитов. Размеры кристаллов кали-натрового полевого шпата, нефелина, а также клинопироксена и биотита достигали здесь 3—5 см. Переход от пегматоидных разностей к среднезернистым, вмещающим их нефелиновым сиенитам, постепенный. Формирование крупнозернистых пегматоидных нефелиновых сиенитов происходило, очевидно, в последнюю стадию кристаллизации.

В противоположность Ботогольскому массиву, совершенно изолированному от окружающих гранитоидов, щелочные породы Нюрганского массива пространственно связаны с граносиенитами.

Граниты и главным образом граносиениты слагают обширные площади в междуречье рек Сенецы и Жом-Балок. Наиболее высокая часть водораздела между этими реками в их нижнем течении слагается комплексом щелочных пород, представленных щелочными и нефелиновыми сиенитами и в меньшей степени нордмаркитами. Совершенно четко, как показал В. П. Костюк (Костюк, Базарова, 1966), устанавливается смесь щелочнозе-

мельных пород сначала субщелочными, а затем щелочными породами; нефелиновые сиениты относятся к наиболее поздним по времени образованиям (рис. 2).

Граносиениты можно отнести к ряду нормальных известково-щелочных пород. Если их рассматривать отвлеченно, то в них нельзя уловить никаких признаков связи со щелочными породами. В зоне экдоконтакта отмечается существенная базификация

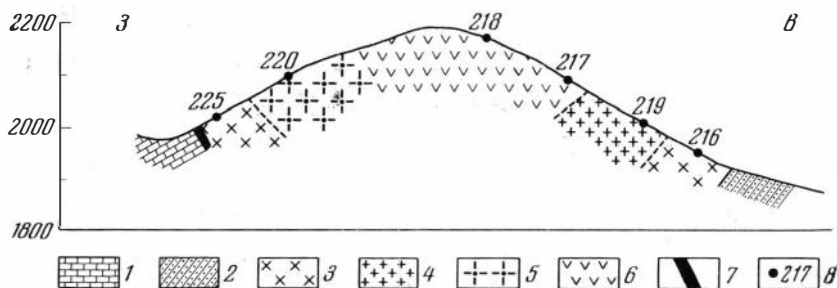


Рис. 2. Схематический геологический разрез Нюрганского массива (В. П. Костюк, 1964)

1—известняки; 2—метаморфические сланцы; 3—граносиениты; 4—щелочные сиениты пироксеновые; 5—щелочные сиениты биотитовые; 6—нефелиновые сиениты; 7—приконтактные габброидные породы; 8—точки обнажений

граносиенитов. Непосредственно в контакте с известняками присутствует почти мономинеральный пироксенит с большим количеством сфена и апатита. В 20—25 см от контакта в пироксенитах появляется основной плагиоклаз, сначала в количестве 15—20%, а затем 45—50%, т. е. пироксенит быстро сменяется пироксеновым габбро, а далее уменьшение основности породы ведет к обычным, совершенно лейкократовым без каких-либо следов приконтактных изменений граносиенитам.

В составе типичных щелочных сиенитов преобладает калинатровый полевой шпат, представленный преимущественно микроклином ($2V=77^\circ$) и значительно реже ортоклазом. Микроклин и ортоклаз переполнены микропертитовыми вростками (структуры распада твердых растворов). На более поздних этапах существенное значение приобретает альбит, образующий по калишпату характерные ленточные структуры замещения. Количество альбита возрастает настолько, что в отдельных случаях альбит начинает преобладать над калиевым полевым шпатом. Иногда альбитизация заходит так далеко, что зерна калишпата сохраняются только в виде реликтов среди новообразований альбита (Костюк, 1964).

Фемические минералы представлены главным образом ярко-зеленым пироксеном $cNg' = 1,754—1,763$; $Np' = 1,728—1,736$;

$Ng' = 53^\circ$. Химический состав этого пироксена почти аналогичен составу пироксена щелочных пород Ботогола:

SiO ₂	40,73	FeO	21,32	Na ₂ O	2,08
TiO ₂	1,61	MnO	0,88	K ₂ O	1,60
Al ₂ O ₃	7,43	MgO	1,72	H ₂ O ⁺	0,61
Fe ₂ O ₃	7,09	CaO	14,40	H ₂ O ⁻	—

Компонентный состав пироксена (мол. %) следующий: эгирин — 19,5, диопсид — 12,4, геденбергит — 64,6. Аналитик И. К. Кузнецова, ИГиГ СО АН СССР.

В подчиненных количествах в щелочных сиенитах Нюргана присутствуют буровато-коричневый биотит ($Nm = 1,686 - 1,700$) и густо-зеленый с коричневым оттенком амфибол ($Ng' = 1,730 \pm \pm 0,002$; $Np' = 1,706$).

Нефелиновые сиениты имеют средне- и мелкозернистую структуру с отчетливой трахитоидной текстурой в среднезернистых разностях, которая обусловлена параллельной ориентировкой уплощенных таблиц кали-натрового полевого шпата (зерна нефелина имеют изометричную форму). Цвет этих пород обычно серый.

Микроскопическое изучение нефелиновых сиенитов обнаружило большое сходство их минерального состава с нефелиновыми сиенитами Ботогольского массива (Костюк, 1964).

Среди минералов, слагающих породу, основную роль играет микроклин-микрпертит; характерен и ленточный тип пертита, но это, очевидно, пертит замещения. Этой особенностью нюрганские нефелиновые сиениты отличаются от ботогольских, где аль-

Таблица 4

Окисел	Калишпат	Нефелин	Окисел	Калишпат	Нефелин
SiO ₂	62,23	45,04	Na ₂ O	6,35	14,08
Al ₂ O ₃	20,68	32,30	K ₂ O	7,87	4,88
Fe ₂ O ₃	—	0,11	H ₂ O	0,52	0,69
CaO	2,70	2,69			
			Сумма	100,55	99,79

Аналитик И. К. Кузнецова ИГиГ СО АН СССР

битизация фиксируется по периферии зерен калишпата в виде своеобразных венцовых структур. В породах Нюргана вообще увеличивается количество альбита: здесь альбит выделяется самостоятельно в виде идиоморфных табличек с полисинтетическими двойниками, что совершенно не характерно для Ботогола.

Химический состав калинатрового полевого шпата, ассоци-

ирующего с нефелином, приведен в табл. 4. Нефелин содержится в породе в количестве 25—30%. Зерна его более или менее изометричны, довольно часто в виде пойкилитовых включений содержат округлые зерна кальцита, вокруг которого развивается канкринит или реже каемки биотита.

Кристаллохимическая формула нефелина: $K_{0,15}Na_{0,67}Ca_{0,07} \cdot Al_{0,90}Si_{1,08}O_4$; компонентный состав в вес. %: нефелин — 74,3, кальсилит — 18,5, избыточный кремнезем 7,2.

В одних разновидностях нефелиновых сиенитов фемические минералы представлены почти исключительно зеленовато-коричневым биотитом, в других — амфиболом. Размер зерен амфибола не превышает 1,5 мм. В шлифах он имеет интенсивно зеленый цвет по *Ng* и *Nm* и резко плеохроирует от светло-зеленых с желтоватым оттенком тонов по *Np*. По оптической ориентировке это гастингсит, по отношению Fe:Mg (подобно ботогольским) — феррогастингсит. Клинопироксен для нюрганских нефелиновых пород не типичен, он встречается вместе с амфиболом в виде единичных мелких зерен. По составу он аналогичен клинопироксену из щелочных сиенитов. Характерным для нефелитовых сиенитов Нюргана является то, что они почти не затронуты постмагматическими процессами и, как правило, совершенно свежие.

На площадке развития нефелиновых сиенитов среди делювия были встречены обломки породы, которая по составу должна быть отнесена к граниту. Вероятно, эти граниты генетически связаны с граносиенитами. Среди делювия были встречены также своеобразные породы с рибекитом, породы, близкие нордмаркитам, но с существенно геденбергитовым пироксеном и рибекитом и, наконец, встречена бескварцевая порода, соответствующая щелочному сиениту с многоминеральной и несколько необычной ассоциацией фемических (эгириновый пироксен, почти непрозрачный по *Ng* биотит и зеленовато-синий амфибол).

Никаких данных о местонахождении этих пород и их взаимоотношениях с вмещающими их нефелиновыми сиенитами нет. Возможно, это жильные образования, но их генетическая связь с остальными членами пород щелочного ряда, с одной стороны, и с граносиенитами, с другой —, несомненна (Костюк, 1964).

С одной стороны, казалось бы, что комплекс щелочных пород Нюргана может являться примером, позволяющим объяснить процесс становления массива дифференциацией гранитоидной магмы с образованием остаточных щелочных расплавов конечных этапов кристаллизации. С другой стороны, геологическая обстановка щелочных пород Нюргана позволяет считать, что щелочные породы возникли путем десицикации граносиенитовой магмы вмещающими известняками, как считают впервые проводившие здесь съемку И. А. Кобеляцкий и О. П. Алексева (Костюк, 1964).

Что касается генезиса Ботогольского массива щелочных пород, то в литературе фигурирует несколько предположений на этот счет.

Б. М. Куплетский (1925) считает, что Ботогольский массив «следует рассматривать как громадное контактное образование между изверженной магмой и известняками. Говорить о самостоятельном очаге щелочной магмы здесь совершенно не приходится ввиду незначительных выходов нефелиновых сиенитов. Присутствие в непосредственной близости от Алиберовской горы мощного Буруктуйского гранитоидного массива и гранитных обнажений северо-восточного отрога Ботогольского... гольца заставляет предполагать связь между этими двумя породами и рассматривать щелочной массив как производный от общего очага гранитной магмы». В настоящее время доказана разновозрастность Буруктуйского и Ботогольского массивов. Небольшие интрузии щелочных сиенитов и нордмаркитов, расположенных по южной и юго-западной периферии Буруктуйского массива, согласно Н. А. Флоренсову (1947) и нашим наблюдениям, разновозрастны с ботогольскими щелочными породами и образуют сетчатые контакты с гранитами и гнейсо-гранитами.

И. А. Флоренсов (1947) считает, что щелочная интрузия в процессе своего развития прошла магматическую, пневматолитовую и гидротермальную стадии и что «образование щелочных пород Ботогольского гольца, вероятно, происходило за счет ассимиляции известняков граносиенитовой магмой, интрузии которой широко развиты в Восточном Саяне».

Такого же мнения придерживается и В. С. Соболев (1947), считавший определяющим фактором в образовании собственно щелочных пород Ботогола ассимиляцию известняков, а не дифференциацию магмы.

Третье представление о генезисе щелочных пород Ботогольского массива было высказано В. П. Солоненко (1950). Он считает, что заключительным этапом внедрения щелочных и кварцевых сиенитов была гидротермальная деятельность, которая привела к метасоматическому преобразованию нормальных сиенитов в щелочные и нефелиновые. Эти породы, по мнению В. П. Солоненко, «несомненно образовались не посредством простой кристаллизации магмы, а путем сиенитизации метаморфических пород щелочными гидротермальными растворами, находившимися на грани пневматолитического этапа».

Геологическая обстановка района развития огнитских гранитоидов и щелочных пород в Окинской структуре совершенно одинакова: они разновозрастны, генетически связаны между собой (в современном представлении) и размещены в одной и той же карбонатной толще; но, несмотря на это, конечный результат кристаллизации граносиенитовой магмы проявился не одинаково.

Во время полевых исследований основное внимание было обращено на изучение контактов между вмещающими и интрузивными породами (Костюк, Базарова, 1966). Детально было изучено более 20 хорошо вскрытых приконтактных разрезов отдельных массивов нефелиновых и щелочных сиенитов, щелочноземельных сиенитов, граносиенитов и гранитов, площади между р. Уриком и левобережьем Жом-Болок. Существенных признаков ассимиляции известняков интрузирующей магмой и связанной с этим дисиликацией ее, а тем более образования пород типа нефелиновых сиенитов на контактах обнаружено не было.

Очень редко в приконтактных зонах проявляется незначительное гидротермальное изменение пород, имеет место также карбонатизация эндоконтактов — порода обогащается кальциевыми силикатами, что фиксируется повышенным содержанием сфена.

Очень часто на контактах отмечается метаморфизм вмещающих известняков с мраморизацией их, а также образование в зонах экзоконтакта метаморфогенных минералов типа диопсида, волластонита, реже гроссуляра и форстерита. Такие явления отмечались в приконтактных известняках Ботогольского массива, в интрузиях щелочных сиенитов и гранитов Буруктуйского массива, в гранитах гольца Гранитного, Нюрганском массиве и других местах. Такие явления отмечаются и другими авторами (Смирнов и Булдаков, 1962; Кобеляцкий, 1947; Плешанов, 1958). Наиболее существенная дисиликация граносиенитов в зоне эндоконтакта с известняками, приведшая к образованию пород типа пироксенитов и габбро в Нюрганском массиве, была описана выше.

Таким образом, интрузии гранитоидного ряда, прорывающие карбонатную толщу монгошинской свиты, в контактах вызывают лишь небольшой по масштабам термальный метаморфизм. Сами гранитоиды в эндоконтактах, по мнению В. П. Костюка (Костюк, 1964), чаще базифицируются; повышения же щелочности не устанавливается. Приведенные выше факты заставляют отказаться от гипотезы образования щелочных пород за счет ассимиляции вмещающих известняков.

Принимая во внимание то, что повышение химического потенциала какого-либо подвижного компонента магмы должно расширять поля кристаллизации минералов, содержащих этот компонент, за счет полей минералов его не содержащих или содержащих в меньшем количестве (Коржинский, 1953), можно представить общую схему процессов минералообразования при становлении Ботогольского массива. На ранних стадиях кристаллизации магмы очень активный калий связывал в полевошпатовую молекулу соответствующие количества Al_2O_3 и SiO_2 . В это же время находящаяся в избытке окись кальция (сильное основание) связывала почти все железо и некоторое незначи-

тельное количество магния в клинопироксене. Какая-то часть железа и калия связывалась в биотите. Таким путем возникли наиболее распространенные в Ботогольском массиве щелочные и среди них пироксеновые сиениты. Щелочность этих пород выражена неярко, их еще нельзя отнести к типичным щелочным породам, о чем говорит их достаточная насыщенность кремнекислотой и обычный (только очень железистый) состав темноцветных минералов.

По мере связывания калия увеличивалась и, наконец, стала резко преобладать активность натрия. В это время основная часть кремнезема в расплаве была уже связана. Связывание кремнезема происходит и далее, так как окись кальция, находящаяся в избытке в расплаве, активно продолжает связывать кремнезем в фемических минералах. Поэтому сначала параллельно с полевым шпатом, а затем преимущественно в нефелине натрий был вынужден связывать кремнезем.

После того как все железо было связано в клинопироксене и частично гастингситовом амфиболе, избыточный кальций выделялся в виде кальцита.

Процесс формирования щелочных пород сводится к перераспределению щелочей в пороодообразующих минералах, которое обусловлено влиянием на ход кристаллизации кальция и изменением активности калия и натрия по мере течения процессов минералообразования.

Таким образом, по мере раскристаллизации сиенитовой (граносиенитовой) магмы остаточные ее порции становились все более недосыщенными кремнеземом. Поэтому самыми последними членами в ряду пород гранитоидного семейства являются нефелиновые сиениты (иногда близкие к уртитам). В хр. Нюрган достаточно полный разрез прекрасно отражает подобную схему.

Постепенное возрастание недосыщенности кремнеземом гранитоидной магмы могло произойти только в процессе десиликции ее карбонатным материалом.

Такая генетическая схема, приведенная В. П. Костюком (Костюк, 1964) для Ботогольского и Нюрганского массивов, представляется нам наиболее приемлемой и логичной.

ЛОВОЗЕРСКИЙ ЩЕЛОЧНОЙ МАССИВ

Нами приводится лишь краткая характеристика главнейших пород дифференцированного комплекса, изучавшихся минералотермометрическими методами.

Дифференцированный комплекс слагают фойяиты, ювиты, уртиты, ийолит-уртиты, апатитовые уртиты, эгириновые и роговообманковые луявриты, малиньиты (Власов и др., 1959). Наиболее широко распространены луявриты, фойяиты и уртиты, слагающие 86% мощности всего комплекса.

Указанные выше породы строго закономерно чередуются: сверху вниз фойяиты сменяются уртитам, уртиты сменяются луявритами, на смену последним опять приходят фойяиты и т. д. многократно повторяются трехчленные пачки фойяит-уртит-луявритов. Полнота дифференцированности выражена лучше всего в верхней части комплекса и постепенно уменьшается к нижней части. Показателем полноты дифференцированности служит наличие или отсутствие близких к мономинеральным пород — уртитов (Власов и др., 1959).

Фойяиты представляют собой светло-серую породу в основном крупно- и мелкозернистую, состоящую из удлиненных табличек микроклина и идиоморфных кристаллов эгирина, между которыми расположены зерна нефелина. Минеральный состав этих пород непостоянен. Содержание основных породообразующих минералов изменяется следующим образом: микроклин от 29 до 85%, нефелин от 9 до 35% и эгирин от 4 до 15%. Наиболее широко распространена разновидность фойяитов, в которой содержится: микроклина 60—80%, нефелина 10—20% и эгирина 5—8% (Власов и др., 1959). Нами изучалась разновидность фойяита, содержащая около 25% микроклина, 35% нефелина, 10—12% эгирина.

Кроме главных породообразующих минералов в фойяитах присутствуют в акцессорных количествах: арфведсонит, ломоносовит, мурманит, эвдиалит, лампрофиллит, виллиомит, рамзаит, лопарит, ринколит, молибденит, сфалерит, галенит, альбит, апатит, ловчоррит, ловозерит, катаплеит, содалит, пектолит, канкринит, нептунит, уссингит, натролит и другие минералы (Власов и др., 1959).

Вторичные процессы в фойяитах более всего проявились в виде содалитизации, альбитизации и натролитизации, причем в верхней части комплекса вторичные процессы проявились особенно интенсивно; здесь же отмечается максимальное содержание акцессорных минералов (Власов и др., 1959). Структура фойяитов гипидиоморфнозернистая; текстура чаще массивная, лишь в переходных зонах вблизи луявритов трахитоидная.

Уртиты — лейкократовая разновидность пород дифференцированного комплекса. Они имеют темно-серый, серый или зеленовато-серый цвет и представляют собой мелкозернистые породы, которые состоят из плотно прилегающих друг к другу зерен нефелина, небольшого количества полевого шпата и эгирина. Структура породы панидиоморфнозернистая, реже пойкилитовая, характеризующаяся наличием мелких, хорошо ограненных выделений нефелина, лопарита и апатита в крупных кристаллах эгирина и микроклина.

Минеральный состав уртитов непостоянен: содержание нефелина варьирует от 75 до 95%; микроклина — от долей процента до 14%; эгирина — от 2 до 20%; апатита — от десятых долей

до нескольких процентов. Кроме того, в аксессуарных количествах встречаются ломоносвит, мурманит, лопарит, металопарит, виллиомит, эвдиалит, ловозерит, катаплеит, лампрофиллит и ринколит (Власов и др., 1959). Наиболее характерны лопарит, редкоземельный апатит и реже — эвдиалит.

Эгириновые луавриты представляют собой средне- и крупнозернистые породы, сложенные микроклином (30—55%), нефелином (20—25%) и эгирином (20—50%). Различают лейкократовые, мезократовые и меланократовые луавриты. Соответственно цвет породы изменяется от серовато-зеленого до темно-зеленого. Структура гилидиоморфнозернистая, текстура трахитоидная, обусловленная ориентированностью лейст микроклина.

Кроме главных породообразующих минералов в аксессуарных количествах встречаются натролит, содалит, альбит, лопарит, апатит, мурманит, ломоносвит, эвдиалит, лампрофиллит, ринколит, ловчоррит, пектолит, уссингит, катаплеит, канкринит, шизолит, виллиомит, сфен, рамзаит и ловозерит (Власов и др., 1959). Нами были изучены мезократовые среднезернистые луавриты с примерно равным содержанием микроклина и эгирина и подчиненным количеством нефелина, составляющим не более 20% объема породы.

Роговообманковые луавриты отличаются от эгириновых наличием наряду с эгирином роговой обманки — арфведсонита. Характерным для этих пород является меньшее по сравнению с другими породами дифференцированного комплекса содержание редкометалльных минералов.

К. А. Власов и другие авторы выделяют условно четыре стадии минералообразования в процессе формирования дифференцированного комплекса.

В первую стадию образовались нефелин, микроклин, лопарит, апатит и эгирин I, который кристаллизовался первым. Нефелин и микроклин в различных породах кристаллизовались в разное время.

В луавритах, например, они кристаллизовались почти одновременно, с некоторым запозданием микроклина.

В фойтитах первым кристаллизовался микроклин, а затем нефелин.

В уртитах первым кристаллизовался нефелин; вероятно, одновременно с нефелином кристаллизовались лопарит и апатит.

Во вторую стадию выделялись эгирин II и минералы титана, циркония и ниобия.

В третью стадию кристаллизовались минералы, содержащие в своем составе летучие (F, Cl, CO₂, SO₃, HCl), а именно: виллиомит, пектолит, альбит, содалит, канкринит и уссингит.

Четвертую стадию минералообразования характеризуют водосодержащие минералы, главную роль среди которых играет натролит, замещающий нефелин, микроклин, альбит, содалит,

канкринит и уссингит. В эту же стадию кристаллизуется тонковолокнистый эгириин III, ассоциирующий с кристаллами натролита.

В породах дифференцированного комплекса широко развиты вторичные процессы, причем интенсивность их проявления увеличивается от нижней части комплекса к верхней.

В описанных выше породах минералотермометрическими методами изучался нефелин и в меньшей степени эгириин II (в фойяите), краткое минералогическое описание которых и приводится ниже.

Нефелин в породах дифференцированного комплекса чаще всего образует зерна неправильной формы, близкой к изометрической. Только изредка в уртитях и еще реже в луавритах встречаются ограненные кристаллы нефелина. Для кристаллов характерно наличие гексагональной призмы (1010) и третьего пинакоида (0001).

Цвет нефелина серый, зеленовато-серый, серовато-зеленый. В тонких пластинках полупрозрачен. Спайность заметна только в шлифах по (0001) и (1010). Оптически одноосный, отрицательный. Двупреломление низкое. Показатели преломления для нефелина пород дифференцированного комплекса очень стабильны. $N_g=1,535-1,547$, $N_p=1,533-1,545$; $N_g-N_p=0,002-0,003$.

Эгириин II. Эгирином второй генерации исследователями, изучавшими ловозерские породы, считается основная масса видимого макроскопического эгирина.

В луавритах он образует скопления игольчатых кристаллов, выполняющих пространство между выделениями микроклина и нефелина. Размер таких кристаллов до 0,5 см. Более крупные кристаллы встречаются в уртитях и фойяитах.

В шлифах эгириин зеленый с различными оттенками. Удлинение отрицательное. Оптически двусный, отрицательный. Плеохроизм по N_g от зеленовато-желтого до соломенно-желтого, по N_m желтовато-зеленый, по N_p от травяно-зеленого до темно-зеленого, иногда даже с синим оттенком. Схема абсорбции: $N_p N_m N_g N_p=2-8^\circ$; иногда больше: $2 V-68-73^\circ$ (по данным К. А. Власова и др.). Показатели преломления эгирина из различных пород дифференцированного комплекса равны: $N_g=1,794-1,78$; $N_p=1,745-1,752$; $N_g-N_p=0,047-0,050$.

До настоящего времени вопрос о происхождении Ловозерской интрузии и механизме ее становления не решен однозначно. Большинство исследователей, отдавая дань процессам ассимиляции, главную роль в механизме внедрения ловозерской интрузии отводят тектоническому фактору (Елисеев, 1938 и др.) Большая мощность массива, приуроченность его к зоне крупного тектонического разлома (Полканов, 1933), крутые контакты с гранито-гнейсами, наличие ксенолитов девонской кровли в глубинах интрузии, по мнению этих исследователей, свидетель-

ствуют о ведущей роли тектоники в механизме внедрения интрузии.

Сложность строения, минерального состава пород и их генезис, по мнению К. А. Власова и других (1959), обусловлен следующими факторами: 1) химическим составом исходной магмы; 2) ассимиляцией вмещающих пород; 3) эманационным процессом; 4) кристаллизационной дифференциацией; 5) изоморфизмом; 6) процессами замещения, происходившими в гидротермальную стадию.

УРАЛЬСКИЙ МИАСКИТОВЫЙ МАССИВ

Минералого-петрографическое описание приводится главным образом по работам Э. М. Бонштедт-Куплетской (1951) и А. Н. Заварицкого (1926—1927).

Миаскиты представляют собой светло-серые и серые средние и крупнозернистые биотитовые нефелиновые сиениты. В центральных частях миаскитовой полосы они имеют массивную текстуру, в периферийных частях — гнейсовидную (Бонштедт-Куплетская, 1951).

Под микроскопом массивные миаскиты имеют гипидиоморфнозернистую структуру. Минеральный состав: микроклин (чаще пертит) — 30—50%, нефелин 20—30% и биотит до 10—15%. Количество альбита изменяется от аксессуарных количеств до 10—15% вблизи рудных жил. Аксессуарные минералы миаскитов представлены цирконом, апатитом, кальцитом, сфеном, ильменитом, магнетитом и пироксеном. Гнейсовидные миаскиты содержат значительно меньше нефелина, больше альбит-олигоклаза и особенно циркона, пироксена и ильменита. Гнейсовидность обусловлена чередованием светлых минералов с полосами, обогащенными биотитом. Слоистость миаскитов отвечает общему простиранию всех пород района. «По всей вероятности, начало возникновения кристаллизационной слоистости миаскитов связано было еще с движениями в магме. У контакта оно регулировалось очертаниями массива и выражалось в возникновении плоскопараллельных структур. В центральной части мы видим лишь следы общего течения вдоль оси антиклинали, в ядре которой залегают миаскиты. Вероятно, внедрение магмы происходило одновременно с образованием антиклинального изогнутия, которое продолжалось и после кристаллизации, вызывая образование катакластических структур» (Заварицкий, 1926—1927).

Нефелин-полевошпатовые пегматиты, из которых исследовались нефелин, канкринит и содалит (так называемый миаскитовый тип), располагаются среди миаскитов. Мелкие тела представляют собой линзы, залегающие согласно. Контакты их с вмещающими породами не резкие, а минеральный состав отвечает таковому в окружающих миаскитах. По существу, это лишь

более крупнозернистые участки миаскитов (Бонштедт-Куплетская, 1951). В большинстве случаев пегматитовые линзы в краевых частях мелкозернисты, в центральных же участках величина зерен микроклина и нефелина часто достигает более 10 см в поперечнике (Амеландов 1929). Это лейкократовые, сложенные в основном микроклином и нефелином породы. В качестве темноцветных минералов в них преобладает биотит; как аксессуарные присутствуют циркон, ильменит, магнетит, иногда апатит, сфен и пирохлор. Наряду с сильно пертитизированным микроклином в промежутках между зернами нефелина и калиевого полевого шпата присутствует в виде мелкозернистых выделений альбит.

Микроклин с микроклиновой решеткой и $2V$ от 72 до 80°; альбит № 8—10, часто по нефелину в шлифах наблюдаются образования канкринита. В литературе Э. М. Бонштедт-Куплетской (1951) описаны пойкилитовые зерна кальцита в нефелине.

Аксессуарные минералы и биотит приурочены к промежуткам между зернами нефелина и микроклина. Лишь изредка обнаруживаются мелкие кристаллы циркона, заключенные в микроклин (в краевых частях зерен микроклина). Последние обстоятельства позволили Э. М. Куплетской сделать вывод о том, что нефелин и микроклин являются наиболее ранними образованиями в этих пегматитах. Все прочие минералы выделялись, по ее мнению, более или менее одновременно, вслед за нефелином и микроклином.

Вторичные процессы в пегматитах Вишневых гор фиксируются замещением нефелина канкринитом (нормальным, сульфатканкринитом, вишневитом), анальцимом, натролитом, шпреустейновой массой, слюдой и галлуазитом. Микроклин, как правило, альбитизируется. Часто замещение нефелина канкринитом (по периферии зерен нефелина) можно наблюдать в шлифах из вмещающих миаскитов.

В пегматитах Курочкина лога наблюдается необычно разнообразная окраска нефелина. Можно встретить прозрачный светло-желтый, почти бесцветный нефелин с сильным стеклян-ным блеском рядом с розовыми и желтоватыми участками с жирным блеском типичного элиолита, иногда встречается и серый нефелин.

Прозрачный нефелин встречается небольшими пятнами. обычно в центральных частях крупных выделений нефелина. Химический состав этого нефелина, по данным Э. М. Бонштедт-Куплетской, дается в табл. 5. Компонентный состав нефелина следующий (в вес %): нефелин — 64,6%, кальсилит — 28,3%, избыточный кремнезем — 7,1.

Практически все петрографы, изучавшие миаскиты Урала, рассматривают их как производные гранитной магмы. Некоторые, допуская ассимиляцию карбонатных пород как фактор де-

Компонент	Вес. %	Компонент	Вес. %	Компонент	Вес. %
SiO ₂	42,75	MgO	1	K ₂ O	7,53
Al ₂ O ₃	34,10	MnO	Следы	H ₂ O ⁺	0,16
Fe ₂ O ₃	0,18	CaO	1,07	H ₂ O ⁻	0,22
FeO	0,56	Na ₂ O	12,57	П. п. п.	0,38
				Сумма	100,14

Примечание. No—1,543, Ne—1,538 (аналитик Нестерова).

силикации гранитной магмы (Белянкин, 1929; Заварицкий, 1926—1927; Е. А. Кузнецов, 1947), особенно большое значение в образовании миаскитов придают минерализаторам (летучим) и особому положению района в тектонической системе Урала.

ОКТЯБРЬСКИЙ МАССИВ

Подробное петрографическое описание щелочных пород сложного Октябрьского массива приводится в работах многих авторов (Morosewicz, 1930; Лучицкий и Лебедев, 1934; Айнберг, 1933; Елисеев и др., 1965 и многие другие).

В настоящей работе дается только краткое описание типичных нефелиновых сиенитов (фойяитов), сделанное по материалам Н. А. Елисеева и др. (1965), нефелин из которых исследовался минералотермометрическими методами.

Нефелиновые сиениты имеют довольно темный цвет за счет черного ганстингсита и мясо-красного нефелина. Это плотные мелко- и среднезернистые породы, почти всегда с отчетливой трахитоидностью. Структура пород гипидиоморфнозернистая.

Полевой шпат — микроклин-микрпертит, в промежутках между зернами которого располагаются мелкие таблички альбита.

Нефелин представлен идиоморфными коротко призматическими кристаллами.

Темноцветные минералы представлены гастингситом, с которым ассоциирует биотит-лепидомелан, и реже — эгириновым пироксеном. В. Г. Кушев (Елисеев и др., 1965) отмечает более ранний эгирин-авгит, который замещается амфиболом, и более поздний эгирин-акмит, нарастающий на лепидомелан.

Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, пирохлором и флюоритом.

По минеральному составу, структуре и текстуре среднезернистые нефелиновые сиениты ничем, кроме отсутствия нефелина, не отличаются от щелочных сиенитов (Кушев и др., 1965).

Исследованный нефелин имеет мясо-красный цвет. Размеры кристаллов от 1—1,5 до 4—5 мм в поперечнике. Поперечные сечения кристаллов прямоугольные и шестигранные. Показатели преломления: $N_g = 1,537$; $N_p = 1,532$; $N_g - N_p = 0,004 - 0,005$.

В. Г. Кушев отмечает двуосность нефелина, причем $2V$ достигает иногда 20° .

Кристаллы нефелина содержат мельчайшие твердые включения тонких ориентированных по L_6 призмочек игольчатых кристаллов эгирина.

Кроме того, В. Г. Кушев отмечает, что нефелин даже в наиболее свежих (не подвергшихся заметным изменениям и вне зоны выветривания) образцах содержит многочисленные мельчайшие включения, недиагностичные даже при самых больших увеличениях, которые, возможно, могут быть интерпретированы как газово-жидкие.

Нефелин из фойяитов, по мнению В. Г. Кушева, кристаллизовался раньше и при более высоких температурах, чем нефелин из пород группы мариуполитов. Об этом говорят петрографические наблюдения, максимальное содержание Na в нефелине фойяитов и положение точки состава на диаграмме Гамильтона (Hamilton, 1961), рассчитанное Л. Л. Перчуком (1965) и В. Г. Кушевым (Елисеев и др., 1965) по анализу фойяита (Mogosewicz, 1930). Исходя из этого, очевидно, можно считать фойяит типичной изверженной породой, наименее всего подвергшейся автometасоматическим и метасоматическим изменениям. Правда, В. Г. Кушев все-таки считает, что «единственными нефелиновыми породами Октябрьского массива, для которых в настоящее время можно допустить бесспорно интрузивное происхождение», являются нефелиновые сиениты дайкового залегания.

Общая картина генезиса щелочных пород Восточного Приазовья, начиная с Л. Ф. Айнберг (1933) и кончая настоящим временем (Елисеев, Кушев и Виноградов, 1965), представляется следующей.

Сиениты, кварцевые сиениты и граниты сложного Октябрьского массива являются настоящими интрузивными телами. Но магматические по своей первичной природе горные породы подвергались автometасоматическим и метасоматическим изменениям и перекристаллизации. Наиболее интенсивно эти процессы проявились в щелочных породах, где в результате автometасоматоза нефелиновых сиенитов и метасоматоза щелочных сиенитов образовалась группа пород мариуполитового типа (Елисеев, Кушев, Виноградов, 1965).

Кроме нефелина фойяитов (коллекция В. Г. Кушева), были исследованы мелкозернистые мариуполиты из коллекций кафедры Минералогии и петрографии Новосибирского университета и содалит содалитового прожилка в нефелине мариуполитового пегматита (музейная коллекция ИГиГ СО АН СССР).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выяснения термодинамических условий формирования изучавшихся щелочных пород использовались минералотермометрические методы (Ермаков, 1950 и др.; Калюжный, 1960; Леммлейн, 1959 и др.), позволяющие установить нижние пределы температур и давления при минералообразовании (Бакуменко, Базаров, Долгов, 1965). Для сопоставлений привлекались результаты экспериментального изучения подобных систем (Боуэн, Таттл, 1952; Hamilton, 1961 и др.) и минералого-петрографических исследований щелочных пород (Костюк, 1964). В комплексе главных породообразующих минералов щелочных пород минералотермометрическими методами (гомогенизация включений, определение давления, криометрия и т. д.) изучались: нефелин, клинопироксен, амфибол, кальцит, канкринит, содалит, гранат, волластонит и пироклор.

Комплекс проведенных нами экспериментальных исследований включает ряд последовательно проводившихся циклов:

1. Изучение характера, типов, морфологии, фазового состава, агрегатного состояния и температур гомогенизации включений. Выбор подходящих включений для проведения последующих экспериментов.

2. Проведение криометрических исследований с целью определения концентрации солей, растворенных в растворах во включениях. Попытки определения состава солей и частичного состава газов на установке для замораживания включений и т. д.

3. Проведение анализа состава газовой фазы индивидуальных включений методом газового анализа, разработанного Ю. А. Долговым и Н. А. Шугуровой (1966).

4. Определение давления во включениях в момент гомогенизации.

Основы минералотермометрических методов изложены в многочисленных работах основоположника отечественной школы геологов-минералотермометристов Н. П. Ермакова, а также

в работах Т. Г. Леммлейна, Ю. А. Долгова, В. А. Калюжного и многих других исследователей. Поэтому в настоящей работе автор на этих вопросах не останавливается. Отметим здесь лишь главные особенности новых приемов, методов и аппаратуры для исследований, а также те затруднения, с которыми пришлось столкнуться при изучении включений в породообразующих минералах щелочных пород.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ГОМОГЕНИЗАЦИИ

До последнего времени максимальные температуры, развиваемые в микротермокамерах, не превышали 600°C (Sorby, 1858; Philips, 1875; Königsberger, 1901; Holden, 1925; Newhouse, 1933; Ермаков, 1944; Чайковский, 1951; Цуринов и Вольнова, 1952; Лоскутов, 1955; Калюжный, 1960).

Приведенные в ряде иностранных и отечественных работ температуры гомогенизации (выше 500°C) получены методом декрепитации (растрескивания). Метод декрепитации в настоящее время разработан недостаточно и не может быть использован при точных минералотермометрических исследованиях вследствие ряда ограничений (Долгов, Серебренников, 1965).

В основу изучения включений в минералах щелочных пород в начальных этапах исследований нами был положен следующий принцип: при изучении вторичных включений в минералах представляется возможным по температуре гомогенизации наиболее ранних вторичных включений ориентировочно судить о температуре минералообразования (Керкис, Костюк, 1963). Впоследствии полученный при изучении минералов материал (обоснование первичности газовой-жидких включений) позволил в ряде случаев интерпретацию результатов измерения температуры гомогенизации производить обычным методом.

При изучении включений в нефелине нефелиновых сиенитов Ботогольского, а затем и Нюрганского щелочных массивов была встречена группа включений, которая не могла быть гомогенизирована в существовавших камерах вследствие низкой температуры, развиваемой в камерах.

В лаборатории минералообразующих растворов ИГиГ СО АН СССР в 1961 г. была сконструирована и изготовлена микротермокамера (рис. 3) для исследований при высоких температурах (Базаров, Долгов, 1965).

Корпус камеры изготовлен из асбоцемента, обладающего высокими термо- и электроизоляционными свойствами и достаточной механической прочностью. Крышки камеры изготовлены из листового асбоцемента толщиной 5 мм и крепятся к корпусу с помощью трех болтов. В крышках прорезаны смотровые отверстия диаметром 26 мм. В корпус вставлены клеммы, к которым

крепятся концы выводов обмотки нагревательного элемента и выводы от автотрансформатора РНО-250-2. Нагревательный элемент изготовлен из двух трубок (кварцевой — внутренней и фарфоровой — наружной). Трубки вставлены одна в другую. Диаметр внутренней трубки 26 мм, внешней — 32 мм. По наружной поверхности внутренней трубки намотана спираль из

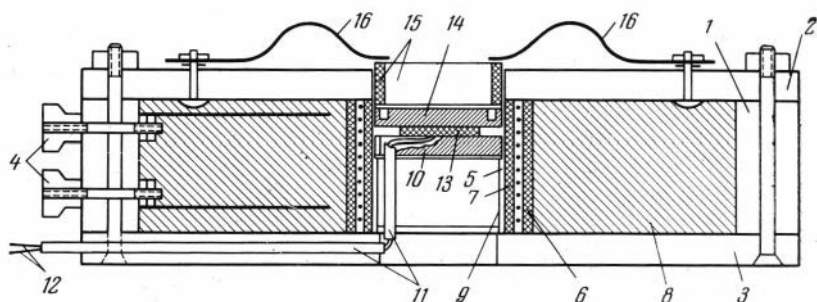


Рис. 3. Высокотемпературная микротермокамера

1—3—корпус из асбестоцемента; 4—клеммы питания; 5—7—термоэлемент; 8—термоизоляция (шамотный кирпич); 9—подставка под кварцевое стекло; 10—кварцевое стекло; 11, 12—термопара; 13—изучаемый препарат; 14—верхнее стекло; 15, 16—кольцо и пружины прижима

жаропрочной проволоки ЭИ-19 диаметром 0,8 мм. Концы спирали подведены к клеммам. Намотка асбестового шнура между витками спирали и установка на концах ее закрепляющих колец обеспечивает неподвижность спирали на всех режимах работы камеры. Толщина проволоки гарантирует безотказную работу камеры в течение нескольких тысяч замеров температур гомогенизации. Для термоизоляции использован ультралегковесный шамотный кирпич. Благодаря совершенной изоляции поверхность камеры нагревается до 60° лишь после 1,5 часа беспрерывной работы.

Внутри нагревательного элемента установлен короткий фарфоровый цилиндр, на котором устанавливается круглая пластинка из кварцевого стекла, точно подогнанная по диаметру нагревательного элемента. Толщина пластинки 3—4 мм. В пластинке просверлено отверстие диаметром 2,5 мм, в которое вставляется двухканальная фарфоровая трубка с термопарой. На верхней плоскости пластинки разделяется алмазным сверлом небольшое углубление в 2 мм от геометрического центра пластинки для размещения спая термопары.

Препарат устанавливается на пластинку из кварцевого стекла интересующей частью возможно ближе к спая термопары. В камере для замеров температур используется платино-платинородиевая термопара, позволяющая достаточно точно заме-

рять температуру в широком диапазоне температур — от 20 до 1600°C.

Для практической проверки точности замеров температур был изготовлен искусственный препарат, представляющий собою пластинку из термостойкого стекла с впаянной в нее тщательно проэталонированной платино-платинородиевой термопарой. Спай термопары изображал изучаемое включение. Проверка показала, что разность в температурах основной термопары и термопары в кварцевом стекле не превышает 1—2°C. Кроме того, для постоянного контроля точности измерений температур проводилась периодическая эталонировка термопары по постоянным точкам изменения агрегатного состояния некоторых химически чистых веществ (температура плавления NaCl, Ag, Cu). Контрольная эталонировка термопары проводилась непосредственно в термокамере. Последнее обеспечивает необходимую точность замеров для данного метода.

Описываемая термокамера работает в диапазоне температур от +20 до 1200°C.

Все замеры температур гомогенизации были проведены на описанной камере. Общая схема установки в целом ничем, кроме камеры, не отличается от применявшихся ранее Н. П. Ермаковым. Подробное описание камеры и установки для гомогенизации приведено в работе Ю. А. Долгова и Л. Ш. Базарова (1965).

При работе с очень мелкими включениями, размеры которых требовали улучшения стандартного освещения, последнее достигалось введением в оптическую систему микроскопа на участке зеркало — препарат дополнительного длиннофокусного конденсатора (Базаров, 1965). Применения длиннофокусных конденсаторов потребовала также длительная работа на микро-термокамерах (более часа за один эксперимент) в интервале температур 700—1000°C.

Исследования проводились на отечественных микроскопах МБИ-6 и универсальном микроскопе с панкратической системой, входящем в комплекс микрокиноустановки МКУ-1.

Методика изготовления препаратов-пластинок аналогична применявшейся ранее (В. А. Калюжный, Н. П. Ермаков и др.), отличие состоит в большей трудоемкости изготовления препаратов, связанной с малой толщиной полированных с двух сторон пластинок (0,05—0,10 мм). Исследуемые минералы — нефелин, канкринит, волластонит — обычно полупрозрачны; пироксены и гранаты густо окрашены и также полупрозрачны.

Хрупкость и трещиноватость таких тонких пластинок вызывает массу неудобств и затруднений как в процессе изготовления препаратов, так и при их исследовании в камерах (нагревательной и охлаждающей) под микроскопом. Лишь в 10% от общего числа изготовленных препаратов удается провести опре-

деления температуры гомогенизации включений. 90% препаратов при микроскопическом изучении по тем или иным причинам оказываются непригодными. Менее 1% пластинок могли быть использованы при криометрических исследованиях, и в исключительных редких случаях удавалось найти достаточно крупные высокотемпературные включения, пригодные для проведения полного цикла экспериментов на одном включении: определение температуры гомогенизации, концентрации солей в растворе и состава газовой фазы этого включения.

Весьма малые размеры включений (тысячные доли миллиметра) потребовали при их изучении в камерах под микроскопом существенно больших увеличений (800—1200 \times), чем обычно применяемые в этой методике увеличения (100—300 \times). Малое рабочее расстояние обычных объектов (40 $^\circ$, 60 \times и т. д.) воздушной иммерсии не позволяет осуществлять изучение этих включений на обычных рекомендуемых для этой цели микроскопах (Долгов, Базаров, 1965) вследствие высокого нагрева объективов. Низкая разрешающая способность длиннофокусных объективов (ОСФ) не позволяет применять длиннофокусные объективы при исследованиях подобных включений.

Малая прозрачность препаратов и малые размеры включений потребовали применения более мощных, чем обычно применяемые, источников света. Нами использовались работавшие с «перекалом» лампы накаливания мощностью 170 *вт*, а также ртутные лампы сверхвысокого давления мощностью 250—500 *вт* (из комплекса микрокиноустановки МКУ-1).

В процессе проведения гомогенизаций включений герметичность включений в каждом случае определялась повторной гомогенизацией. Результаты повторной гомогенизации, отличающиеся от первой более чем на 10 $^\circ\text{C}$ (при температурах гомогенизации более 600 $^\circ\text{C}$), отклонялись и в дальнейшем не учитывались. Малая толщина пластинок обусловила большое количество негерметичных включений. Лишь около 40% от общего числа прогомогенизовавшихся включений сохранили герметичность и были использованы для генетических выводов. 60% определений при повторной гомогенизации были отброшены. Общее количество двойных гомогенизаций герметичных включений составляет около 4500 определений.

ВОПРОСЫ ПЕРВИЧНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЙ

При изучении включений в нефелине из щелочных пород различных щелочных массивов были встречены разнообразные включения, среди которых выделяются: твердые кристаллические включения (аксессуарные и другие, кристаллизовавшиеся раньше или совместно с минералом-хозяином, минералы); затвердевшие раскристаллизованные включения, представляющие

собой реликты расплава, захваченного при кристаллизации минерала-хозяина, и газовой-жидкие включения.

Вопросы «первичности» включений в минералах рассматриваются в работах Л. В. Шубникова (1935), Д. П. Григорьева (1948), Н. П. Ермакова (1950), В. А. Калюжного (1960), Г. Г. Леммлейна (1959) и других исследователей. Главными признаками, позволяющими отнести изучаемые включения к первичным, являются: приуроченность первичных включений к определенным зонам роста кристалла, ориентировка первичных трубчатых включений, субпараллельная ориентировка первичных твердых кристаллических и газовой-жидких включений, температуры гомогенизации (для случаев, когда известно гидротермальное происхождение изучаемого кристалла), отсутствие связи с залеченными трещинами и т. д.

Изучая включения в минералах, исследователь каждый раз сталкивается с проблемой обоснования их первичности. В случаях, когда имеется уверенность в гидротермальном происхождении кристалла, при наличии некоторого опыта вопрос разрешается довольно просто. Достаточно исследовать наиболее высокотемпературные включения, приуроченные к одноименным зонам роста кристалла. В случаях же, когда не представляется возможным выделить одноименные зоны роста и когда отсутствуют данные об агрегатном состоянии минералообразующих растворов, положение усложняется, и исследователь зачастую сталкивается со значительными трудностями в обосновании первичности изучаемых включений.

Неверное определение первичности включений, особенно при недостатке опыта в минералотермометрических исследованиях, может привести к серьезным ошибкам.

В связи с этим является очевидной необходимость разработки каких-либо дополнительных критериев для обоснования первичности включений в породообразующих минералах изверженных горных пород, что, очевидно, и будет сделано со временем исследователями включений, когда будет накоплен достаточно обширный материал по исследованию подобного рода объектов.

Максимальный интерес представляет группа газовой-жидких включений, гомогенизирующихся в интервале температур от 680—700 до 850—980°C в большинстве случаев в жидкую фазу. Фазовый состав и соотношение фаз ничем не отличаются от имеющихся во вторичных включениях. Это типичные 2- и 3-фазовые включения, состоящие из пузырька газа и жидкости, иногда с третьей — твердой фазой. Размеры включений весьма малы, обычно не превышают 0,005 мм в поперечнике. Они не приурочены к трещинам и не обладают ни одним из признаков вторичных или мнимо вторичных включений. Не зная заранее температуры их гомогенизации по фазовым соотношениям и составу, нельзя предполагать высокой температуры их гомогенизации.

При дальнейшем детальном их изучении выявилась одна характерная присущая только этим включениям особенность. Эта особенность заключается в изменении формы включения (очевидно, переотложение материала внутри включения) при температурах, близких к температурам гомогенизации.

Эта особенность была принята нами в качестве критерия для обособления такого рода включений в отдельную группу, а высокие температуры гомогенизации (до 980°) и отсутствие общепринятых признаков вторичности позволили предположить первичность этой группы включений и считать их реликтами летучих, отделившихся от магмы в процессе кристаллизации.

В настоящее время имеется довольно скудный экспериментальный материал по вопросам концентрации и механизма отделения летучих из магмы (Goranson, 1931, 1936, 1937; Боуэн и Таттл, 1950, 1952 и др.) и довольно обширный материал по интерпретации этих данных применительно к различным геологическим ситуациям (Заварицкий, 1926—1927; Николаев, 1945; Ingerson, 1955 и др.). Практически всеми исследователями, занимающимися проблемами петрологии, в той или иной мере затрагивается этот вопрос. Многие петрологи признают существование ограниченной растворимости летучих в расплавах (магме) и в своих работах представляют модели процесса отделения летучих из кристаллизующейся магмы (Власов, 1955 и др.). Основные положения вопроса отделения летучих в работах, приведенных выше, заключаются в следующем. При снижении температуры расплава достигается концентрация насыщения летучих. Дальнейшее снижение температуры вызывает отделение избыточной против концентрации насыщения части летучих. Выделившиеся таким образом избыточные части летучих подвергаются гравитационной дифференциации и накапливаются в верхних частях кристаллизующегося объема магмы.

Применяя этот механизм в нашем случае, мы полагаем, что выделившиеся мельчайшие пузырьки летучих могут быть захвачены в процессе кристаллизации нефелина нефелиновых сиенитов.

Захват пузырьков в магме облегчается высокой степенью вязкости расплавов и ухудшением условий для диффузии в области соприкосновения пузырька с кристаллом. Эти пузырьки летучих и представляют собою высокотемпературные включения, имеющие характеристики магматических условий кристаллизации. Плотность и состав растворов в высокотемпературных включениях зависят от существовавших в процессе кристаллизации температуры и давления летучих и в общем случае характеризуют эти условия.

Таким образом, по нашему мнению, температуры гомогенизации высокотемпературных включений в минералах магматических горных пород в некоторых случаях могут быть исполь-

зованы для оценки минимальной истинной температуры их кристаллизации.

Существенные затруднения при изучении вызывают также вопросы обоснований отсутствия явлений расшнуровки первичных включений. Работами Г. Г. Леммлейна (1951) показана возможность расшнуровки включений при залечивании трещин в кристаллах. При расшнуровке включений до гетерогенизации захваченного раствора включения имеют одинаковые температуры гомогенизации и агрегатное состояние. При расшнуровке после гетерогенизации возможны случаи обособления включений с аномальным (по отношению к изначальному) соотношением фаз. В этих случаях температуры гомогенизации включений могут отличаться от истинных как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения их. Поэтому при определении температур гомогенизации необходимо обращать внимание на характер изучаемых включений, на отсутствие признаков расшнуровки, изложенных в работах Г. Г. Леммлейна. По нашему мнению, во всех случаях наличие одинаковых температур гомогенизации первичных включений позволяет с уверенностью судить об отсутствии явлений «расшнуровки» включений после гетерогенизации растворов.

Несомненными признаками отсутствия «расшнуровки» включений после гетерогенизации растворов в нашем случае являются также следующие положения:

1. Отсутствие включений, гомогенизирующихся в газовую фазу (массивы Ботогол и Нюрган).

2. Наличие в одном поле зрения микроскопа нескольких высокотемпературных включений, гомогенизирующихся при одних и тех же температурах (Ловозерский и Нюрганский массивы, Ильменские горы).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИИ

Методы определения давления, существовавшего в процессе кристаллизации минералов, в настоящее время разработаны недостаточно и являются важной проблемой в генетической минералогии. Существующие в настоящее время методы по характеру используемых приемов могут быть разбиты на три главные группы: 1) определение давления (глубины формирования) реставрацией разреза; 2) определение давления, при котором образовался минерал (порода) по данным экспериментального изучения подобных систем (поля устойчивости минерала в данной парагенетической ассоциации); 3) определение давления при минералообразовании с использованием реликтов минералообразующих сред (включений).

Естественно, что определение давления методами первых двух пунктов носит приблизительный, ориентировочный характер, обусловленный особенностями методов (малая достоверность реставрации разрезов, отличие природных многокомпонентных систем от исследованных), и в практике исследовательских работ используется лишь для грубой оценки. Нами использованы данные этих методов для сопоставлений с результатами, полученными при определении давления минералотермометрическими методами.

Применение минералотермометрических методов для определения давления, существовавшего в процессе кристаллизации изучавшихся пород, в начальных этапах исследований основывалось на следующих положениях: изучение наиболее высокотемпературных вторичных включений в минералах изверженных пород позволяет подойти к определению температуры их кристаллизации; определение давления в момент гомогенизации этих включений позволяет судить о давлении летучих, обособившихся в межзерновых, трещинных и поровых пространствах, способствовавших залечиванию вторичных трещин непосредственно после кристаллизации щелочных пород.

Естественно, что полное давление, при котором проходила кристаллизация, было выше полученного в наиболее высокотемпературных вторичных включениях в момент гомогенизации. Таким образом, применение минералотермометрических методов исследований позволяет определить нижний предел температуры и давления процессов кристаллизации изучавшихся пород.

Как известно, среди минералотермометрических методов определения давления наибольшей известностью в настоящее время пользуется метод, предложенный В. А. Калюжным (1953, 1955, 1960), основанный на допущении условий кристаллизации минерала из двухфазового раствора (кипение). Метод заключается в определении удельного объема по диаграммам давления при температуре гомогенизации.

Поскольку углекислотные (CO_2) жидкие включения встречаются сравнительно редко, этот метод имеет ограниченное применение.

Способ определения давления, предложенный Г. Г. Грушкиным, основан на определении разности между температурой гомогенизации включений в минералах и температурой гомогенизации, подсчитанной по данным объемного расширения для чистой воды с учетом прироста объема включения за счет нагревания до температуры гомогенизации. «Разница температуры между фактической и вычисленной точками гомогенизации, помноженная на коэффициент объемного расширения жидкости в этом температурном интервале, позволяет найти тот дополнительный объем, который должен быть сжат, чтобы сохрани-

лось в силе уравнение постоянного объема. Коэффициент объемного сжатия жидкости в пределах температур гомогенизации включений позволяет легко вычислить это давление» (Грушкин, 1953). Метод этот не получил распространения вследствие требований высокой точности определения соотношения фаз во включениях (до тысячных долей процента) и необходимости весьма точного определения температуры гомогенизации включений (особенно для жидких включений).

Методы, предложенные Ионсеном (Jonhsen, 1920), Холденом (Holden, 1947), С. А. Чайковским (1951), обладают существенными недостатками (не учитывается изменение удельного объема CO_2 , парциальное давление воды, состав летучих во включениях и т. д.) и в практике исследовательских работ почти не используются.

При определении давления во включениях нами применялся метод, разработанный Ю. А. Долговым, Л. Ш. Базаровым и И. Т. Бакуменко (1965), использовавших рекомендации П. В. Клевцова и Г. Г. Леммлейна, применявших замораживание для определения концентрации хлоридов во включениях. Г. Г. Леммлейн и П. В. Клевцов исследовали замораживание для выяснения следующих моментов: 1) для определения концентраций солей в растворах; 2) для получения некоторых суждений о солевом составе; 3) для определения температуры гомогенизации жидких однофазных включений; 4) для получения точного относительного количества углекислоты. Ими впервые при изучении условий образования кварца с Южного Урала было определено давление во включениях с учетом влияния растворенных солей и углекислоты (CO_2) (Клевцов и Леммлейн, 1958). Эти работы были ограничены применением относительно небольшого диапазона охлаждения (-40 — 80°C) и проводились на основе нагревательно-охлаждающего столика конструкции Г. Г. Цуринова и В. А. Вольновой (1952).

Следует отметить, что в настоящее время замораживание включений для различных целей применяется в ряде лабораторий СССР (Н. П. Ермаков, МГУ; Н. И. Мязь, г. Львов и т. д.) и за рубежом (Roedder, 1963).

Сущность приемов определения давления, применявшихся нами, заключается в определении в индивидуальном включении истинного количества CO_2 и других газов, а также концентраций растворенных солей с последующим определением по диаграммам суммарного давления во включении при температуре гомогенизации.

Концентрации растворенных солей в газовой-жидких включениях определялись нами на установке для глубокого охлаждения включений в лаборатории минералообразующих растворов ИГиГ СО АН СССР. Состав газовой фазы включений определялся методом газового анализа индивидуальных вклю-

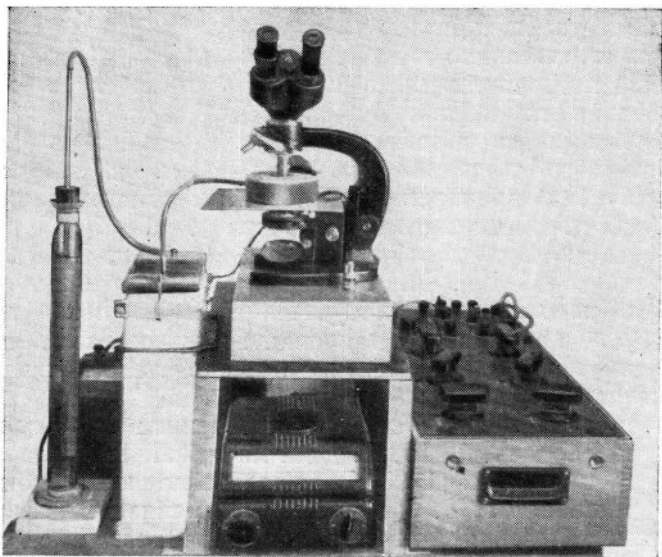


Рис. 4. Установка для замораживания включений. Общий вид (объясн. в тексте)

чений, разработанным Ю. А. Долговым и Н. А. Шугуровой (1965).

Установка (сконструирована и изготовлена в Институте геологии и геофизики СО АН СССР) для замораживания включений (Базаров, 1966) представляет собой совокупность следующих основных агрегатов: охлаждающая камера, микроскоп, потенциометр (ППТН-1), сосуд Дьюара, нормальный элемент, микровольтметр, накальная батарея, приспособление для регулировки скорости охлаждения препарата. Установка позволяет вести исследования в интервале температур от $+20^{\circ}\text{C}$ до -180°C . Общий вид установки приведен на рис. 4. Охлаждающая камера (рис. 5) состоит из следующих деталей: 1 — охлаждающий корпус, изготовленный из красной меди; 2 — внутренняя охлаждающая втулка; 3 — термоизоляционные стекла (обычно покровные); 4 — термоизоляционный корпус (пенопласт); 5 — фарфоровая двухканальная трубочка; 6 — медь-константановая термопара; 7 — металлическая трубка (ввод для охлаждающего азота); 8 — шайба из текстолита; 9 — кожух из тонкой резины (палец от хирургической перчатки); 10 — верхняя крышка камеры; 11 — шурупы; 12 — отверстия для выхода газообразного азота; 13 — препарат-пластинка; 14 — теплоизоляционный промежуток; 15 — пружина (сталь).

Устройство, регулирующее подачу жидкого азота, состоит из следующих деталей (рис. 6): 1 — сосуд Дьюара; 2 — кожух-

термоизолятор (пенопласт); 3 — пластмассовые накладки; 4 — стяжные болты (М-5); 5 — верхняя крышка кожуха (оргстекло); 6 — короткая трубка (латунь); 7 — длинная трубка для подачи жидкого азота в камеру (латунь); 8 — микропористая резина (прокладка); 9 — резиновые трубки; 10 — регулятор

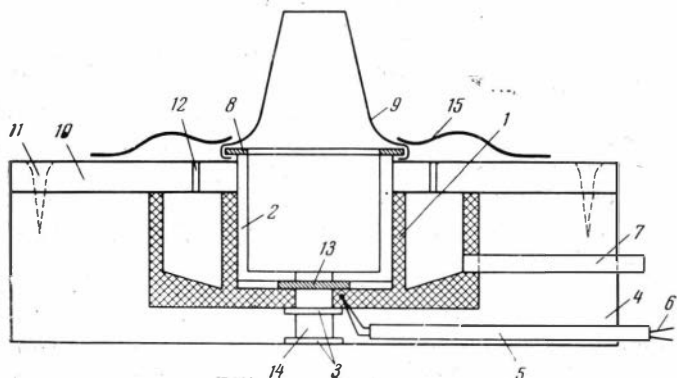


Рис. 5. Схема охлаждающего устройства.
Установка для замораживания включений (объясн. в тексте)

(латунь); 11 — пробка с отверстиями для трубки и для выхода азота; 12 — мерный сосуд с делениями.

При работе на установке выполняются следующие операции: исследуемый препарат помещается на дно камеры. Внутренняя втулка опускается на препарат и прижимается пружинами 15 (рис. 5). Верхний конец резинового кожуха 9 надевается на объектив микроскопа. Резиновый кожух защищает объектив и внутреннюю часть камеры от инея. Большой внутренний диаметр втулки 2 и малое сопротивление кожуха 9 обеспечивают легкость маневров камерой при опущенном объективе микроскопа. Далее, трубка 10 (рис. 6) регулятора в зависимости от желаемой скорости охлаждения опускается в воду на требуемую глубину; давление в сосуде Дьюара повышается, и жидкий азот по трубке 7 (рис. 6) начинает поступать в камеру, охлаждает ее и, испаряясь, улетучивается через от-

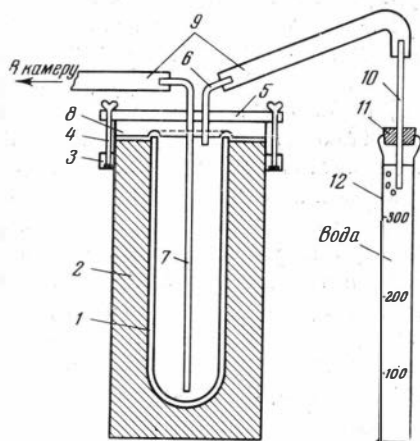


Рис. 6. Установка для замораживания включений (объясн. в тексте)

верстия 12 (рис. 5). Скорость охлаждения препарата обычно в каждом отдельном случае подбирается пробным охлаждением и при желании может замедляться до остановки на заданной температуре. При использовании съемных насадок на микроскопе одновременно ведется наблюдение и фотографирование изменений в фазовом составе включений. Расход жидкого азота 1 л за 2—2,5 часа работы установки.

Описываемая установка позволяет определять температуру замерзания хлоридных растворов и, соответственно, концентрации солей в растворах во включениях, получать для газовых включений весь объем CO_2 в виде твердой фазы, выморозить некоторые газы в виде твердой фазы (H_2S), получить единые кристаллы различных газов и солей во включении (геометрический отбор), оценить растворимость CO_2 в солевых растворах при низкой температуре и т. д.

Знание состава включений представляет возможность использовать имеющиеся в литературе экспериментальные данные для определения давления в момент гомогенизации включения. Определение температуры гомогенизации и агрегатного состояния среды в момент гомогенизации включения обычно проводится в процессе минералотермометрического изучения и, как правило, предваряет эксперименты с охлаждением.

При определении давления нами использовались диаграммы фазового равновесия системы $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$, составленные М. А. Стыриковичем и И. Х. Хайбуллиным (1956). РТ диаграмма для чистой воды, составленная М. П. Вукаловичем (1958), диаграмма системы $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ и РТ диаграмма CO_2 (рис. 7) Сурираяна и Кеннеди (Sourirajan, Kennedy, 1962) и другие.

Расчеты по определению давления сводятся к определению удельного объема CO_2 или других газов (при их наличии), к введению поправок (парциального давления CO_2 или других газов) и определению давления, развиваемому солевым раствором. Известные затруднения при первых опытах с замораживанием включений составило определение истинной температуры замерзания включений. В зависимости от темпов охлаждения метастабильное состояние растворов может сохраняться до весьма глубоких охлаждений (—180 и более) без кристаллизации даже при длительной выдержке (несколько часов) и механической вибрации препарата. Лишь весьма резким изменением температуры удается вызвать кристаллизацию раствора во включениях. Сущность приема определения истинной температуры замерзания, применявшегося автором, заключается в перекристаллизации нескольких мелких кристаллов льда (для включения с недосыщенными растворами) в один крупный с последующим медленным его растворением. Температура, при которой находится в равновесии последний мельчайший остаток кристалла льда и раствор, принималась за истинную. Малейшее пониже-

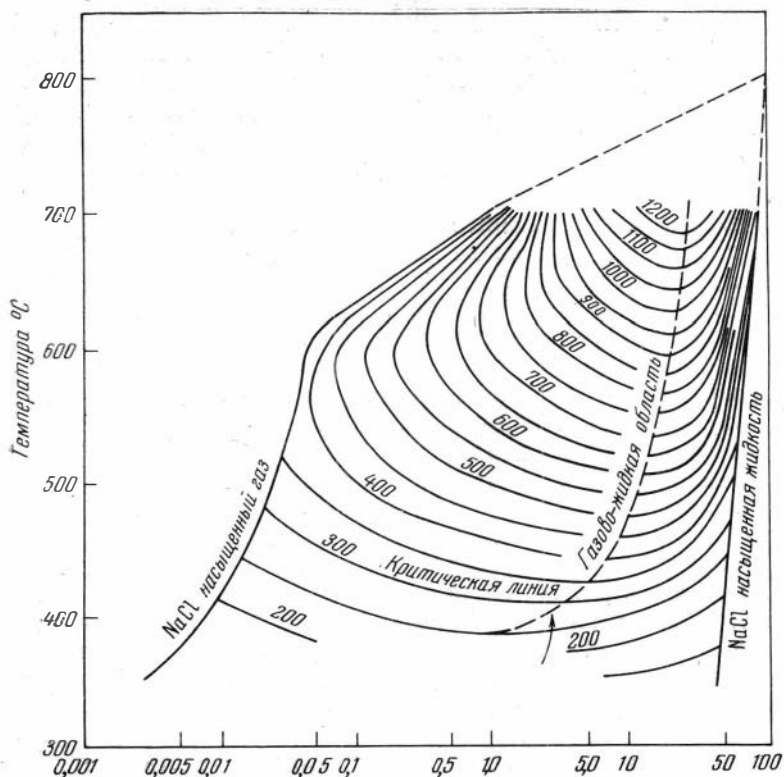


Рис. 7. Диаграмма системы NaCl—H₂O (Сурираян, Кеннеди, 1962)

ние температуры (на 0,05 °C) вызывает рост кристалла, повышение на ту же величину вызывает его полное растворение. Количество тепла, отнимаемое от камеры испаряющимся азотом, равно количеству тепла, полученному камерой извне, система находится в равновесии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ НЕФЕЛИНСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД

Петрогенетические проблемы формирования щелочных пород не могут быть решены без учета летучих, участвующих в кристаллизации природных магм. Главнейшее значение среди летучих имеют вода (Эйтель, 1962) и углекислота, составляющие обычно до 70—99,9% от общего количества летучих. Роль летучих в процессах кристаллизации расплавов подчеркивается многими петрологами: Сорби (Sorby, 1858), Накен (Nacken, 1921), Боуэн (Bowen, 1922), Еккерман (Eckerman, 1938), Леман (Le-

тап, 1941), А. Е. Ферсман (1940), А. Н. Заварицкий, В. А. Николаев (1945, 1947), Ниггли (Nyggli, 1946) и многие другие.

Изучение равновесий между силикатами и летучими компонентами в расплавах позволяет подойти к решению важных петрогенетических проблем формирования изверженных пород и связанных с ними пегматитов и различных рудных и нерудных жил.

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные исследования систем с летучими компонентами (Goranson, 1931; Боуэн и Таттл, 1952; Robertson, Birch, MacDonald, 1957; Roy, Osborn, 1954; Иодер, 1954 и др.) позволяют наметить лишь общие границы влияния содержания летучих компонентов на процессы кристаллизации.

Четырехкомпонентная система $\text{NaAlSiO}_4\text{—KAlSiO}_4\text{—SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$, изучавшаяся Гамильтоном и Мак-Кензи, является одной из наиболее близких к природным системам. Полученные ими данные позволили выяснить пределы растворимости SiO_2 и определить состав нефелинов равновесных со щелочным полевым шпатом при 700°C и давлении воды около 1050 атм . К сожалению, вопрос о влиянии различного давления воды на температуру плавления в работе Гамильтона и Мак-Кензи не освещается. Во всех опытах авторы при 700°C и 1050 атм получали расплавы. Последнее обстоятельство представляет для нас чрезвычайную важность, так как агрегатное состояние кристаллизующейся системы имеет существенное генетическое значение. Поскольку вода не входит составной частью ни в одну из полученных твердых фаз (Гамильтон, Мак-Кензи, 1963), представляется возможным сделать вывод об ограниченной растворимости летучих в расплавах щелочного состава, подобно растворимости воды, полученной Горансоном (Goranson, 1931) в расплавах гранитного состава. При минералотермометрическом изучении породообразующих минералов свежих нефелиновых сиенитов (не подвергшихся существенному гидротермальному воздействию) было обнаружено значительное количество первичных твердых и газожидких включений. Еще в 1858 г. Сорби описал подобные включения в различных минералах и определил их физические особенности. Им было показано, что пузырьки в обсидианах аналогичны пузырькам в искусственных стеклах и что своим происхождением они обязаны выделению газа в расплавах при охлаждении. Им было установлено, что растворимость газов в стеклах зависит от температуры.

Растворимость газов в жидкостях зависит от давления этих газов и изменяется в соответствии с законом Генри, обуславливающим соотношение между давлением и количеством адсорбированного газа: $C_2 = K \cdot P$ (Эйтель, 1962), где C — количество адсорбированного газа; K — коэффициент пропорциональности; P — давление. Силикатные расплавы в магматических очагах

содержат существенные количества растворенных летучих (эффузивы, переполненные газовыми пузырьками).

Работами П. Е. Воске (1923), Д. С. Белянкина и В. П. Ивановой (1935), Гили (Gilluly, 1948) и многих других исследователей установлено, что вода является наиболее важным компонентом в составе растворенных летучих. Присутствие летучих в расплавах играет существенную роль в понижении температуры формирования (плавление породы и отдельных минералов по сравнению с сухими системами). Влияние летучих сказывается и на самих процессах кристаллизации: образование минеральных парагенезисов с минералами, содержащими воду, хлор, фтор и т. д.; образование высокотемпературных комплексных соединений с тяжелыми металлами; влияние на кристаллизацию изменения рН расплава в зависимости от изменения рН летучих при изменении температуры (Хитаров, 1957) и т. д.

В настоящее время мы не имеем возможности из-за отсутствия соответствующих методов получить представление о качественной и количественной характеристике летучих, содержащихся непосредственно в расплаве. Эта возможность, вероятно, будет получена, когда разработка в ИГиГ методов определения (качественного и количественного) состава индивидуальных высокотемпературных первичных газовой-жидких включений будет завершена. Имеющиеся в настоящее время методы определения валового состава включений в минералах (водные вытяжки) позволяют составить представление о качественной и количественной стороне состава летучих за всю историю существования минерала (породы).

Вопросами определения состава минералообразующих растворов во включениях в настоящее время занимаются многие исследователи: Н. П. Ермаков (1950, 1957), Ю. А. Долгов и др. (1965), В. А. Калюжный (1960), А. И. Захарченко (1955) и многие другие. К сожалению, их исследования охватывают в основном лишь минералы, кристаллизовавшиеся в пневматолитовую и гидротермальную стадии минералообразования (пегматиты, гидротермальные жилы, скарны).

В настоящее время существуют два направления в определении состава минералообразующих сред:

1) определение состава индивидуальных крупных включений методами ультрамикрoхимии, развиваемые В. А. Калюжным (1960, 1961) и И. Н. Масловой (1958, 1961), и 2) определение валового состава включений методами водных вытяжек (Грушкин, Приходько, 1952; Roedder, 1960; Калюжный, 1961; Лисицын, 1961; Хитаров, 1965 и др.).

Определение состава методами ультрамикрoхимии представляет больший интерес, нежели определение состава методом водных вытяжек. Но его применение возможно лишь при наличии в исследуемых минералах крупных включений с достаточно

высокой концентрацией растворенных веществ. Величина концентрации обуславливается чувствительностью методов. В случаях, когда объединяются при вскрытии несколько средних или мелких включений, этот метод теряет свои преимущества перед методом водных вытяжек.

Результаты химического анализа водных вытяжек минералообразующих сред представляют собой суммарный, валовый состав растворов (летучих), охватывающий всю историю существования исследуемого минерала в соответствии с характером и типом находящихся в нем включений. Наряду с первичными, составляющими лишь часть общего количества включений обычно присутствуют вторичные включения, характеризующие посткристаллизационную историю минерала. В этой связи применение метода водных вытяжек в качестве приема, позволяющего определить состав содержащихся в расплаве летучих, за редким исключением (см. ниже), дает лишь общую картину состава растворов. Применение этого метода позволяет определить состав растворов, близкий к первоначальному лишь при изучении состава в минералах, которые по условиям образования не содержат вторичных включений. Приготовление растворов — водных вытяжек содержимого газовой-жидких включений — осуществлялось нами в соответствии с имеющимися в литературе данными (Калужный, 1961; Лисицын, 1961; Ходаковский, Хитаров, 1965). В каждом случае последовательно выполнялся следующий ряд операций: дробление образца породы проводилось сначала на наковальне до фракции примерно $1-1,5 \text{ см}^3$, затем в агатовой ступке до фракции $1-2 \text{ мм}^3$ (более мелкий материал и пыль отсеивались). Оставшийся на сите материал также тщательно просматривался под бинокулярной лупой с целью удаления из образца всех инородных примесей. Отобранная фракция десятикратно промывалась дистиллированной водой, 15 раз бидистиллятом, потом сушилась в сушильном шкафу при температуре $50-70^\circ \text{C}$. Затем проба взвешивалась и помещалась в глубокую агатовую ступку с крышкой (во избежание потерь материала), в которой и происходило собственно вскрытие включений — истирание образца до размера частиц $0,0001 \text{ мм}$. После растирания (для учета потерь) проба еще раз взвешивалась, а затем осуществлялась непосредственная экстракция, для чего к растертому образцу, помещенному в стакан, приливался бидистиллят из расчета $1:3$ по весу. Полученная суспензия в течение 15 минут тщательно перемешивалась при комнатной температуре и еще 15 минут при температуре $60-70^\circ \text{C}$. После отстаивания раствор фильтровался через керамический фильтр с максимальным диаметром пор $1,51 \text{ м}$; вакуум создавался при помощи водоструйного насоса Комовского. Раствор хранился в плотно закрытой кварцевой посуде.

Для того чтобы учесть количество элементов самого мине-

рала, растворившихся в воде, была проведена контрольная водная вытяжка из промытого и высушенного осадка, оставшегося на фильтре. Вытяжка проводилась с соблюдением тех же условий, что и первая. Определение катионов Si, Al, Ca, Fe, Mg, Ti осуществлялось на многоканальной фотоэлектрической установке — квантометре — в ИГиГ СО АН СССР Н. В. Арнаутовым. Калибровка квантометра производилась по эталонным титрованным растворам всех определяющихся элементов. К и Na определялись методом пламенной фотометрии.

Определение анионов производилось автором. Хлор-ион и сульфат-ион определялись турбидиметрическим методом; бром-ион определялся колориметрическим методом с фуксиносерной кислотой. Определение гидрокарбонат-иона производилось одним из вариантов объемного метода. Фтор-ион определялся колориметрическим методом с цирконализариновым лаком. Принятый в литературе способ интерпретации результатов химического анализа водных вытяжек (в мг) на 100 г образца, по нашему мнению, не дает представления о характере концентраций растворов во включениях и практически отражает только качественную сторону химического состава растворов. Необходимость учета количества растворов во включениях в минерале очевидна. Результаты химического анализа необходимо представлять в виде весовых соотношений: соль — раствор или соль — вода.

Для ориентировочной оценки состава газовой фазы первичных высокотемпературных индивидуальных включений был использован метод газового анализа, разработанный и детально изложенный Ю. А. Долговым и И. А. Шугуровой (1965).

Метод основан на селективном поглощении газов H_2S , SO_2 , Cl , CO_2 , NO , O_2 , H_2 , CO непредельных и предельных углеводородов специально подобранными для этой цели поглотителями. Метод позволяет производить газовый анализ даже во включениях, не превышающих сотые доли миллиметра.

Пластинка-препарат, содержащий изучаемое включение, помещается в поглотитель, заключенный между линзами специального устройства, смонтированного на предметном столике микроскопа. Под микроскопом при помощи объектмикрометра производится замер объема газовой фазы во включении (диаметр пузырька). Вскрытие включения осуществляется раздавливанием пластинки между линзами устройства (при постоянном наблюдении этого процесса в микроскопе). При вскрытии объем газовой фазы обычно изменяется за счет разности атмосферного давления и давления, существующего во включении при комнатной температуре. Диаметр вскрытого и вышедшего из включений пузырька (газовой фазы) измеряется при комнатной температуре до и после поглощения в поглотителе. По разности объемов пузырька до и после поглощения определяется содержание того или иного газа в газовой фазе включения, приведенной к одной атмосфере.

Часть III

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже приводятся сведения о результатах детальных минералотермометрических исследований нефелинсодержащих пород из различных районов СССР. Для удобства изложения весь полученный материал сгруппирован в четыре раздела. Первые три раздела содержат непосредственный фактический материал экспериментов; четвертый является обобщающим, сводным и содержит представления об условиях формирования изучавшихся щелочных пород.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗУЧАВШИХСЯ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД

При детальном исследовании включений в минералах щелочных пород (нефелин, клинопироксен, кальцит, канкринит, содалит, гранат, волластонит и др.) применялся прием последовательного изучения включений от наиболее низкотемпературных к высокотемпературным. Изучение температурных условий формирования пород осуществлялось методами гомогенизации включений в средне- и высокотемпературных микротермокамерах конструкции Ю. А. Долгова и Л. Ш. Базарова (1965).

В процессе проведения полевых работ (Ботогол, Нюрган), автор стремился отобрать материал, наиболее характеризующий все особенности истории формирования массивов щелочных пород. При отборе образцов пород для минералотермометрического изучения охватывались все разновидности нефелинсодержащих пород Ботогольского и Нюрганского массивов.

Для исследования подбирались, как правило, сечения зерен, ориентированные параллельно или перпендикулярно оптической оси для нефелина и параллельно удлинению для двuosных минералов. Толщина пластинок выбиралась в зависимости от прозрачности минерала и обычно для прозрачных и полупрозрачных составляла 0,05—0,1 мм.

Общее число замеров температур гомогенизации отдельных включений в минералах всех изучавшихся массивов составляет около 12 000 замеров. Повторные нагревы (проверка на герметичность) выдержали около 4500 включений, которые и были использованы при выяснении температурных условий формирования пород.

Последовательное изучение включений от низкотемпературных к высокотемпературным позволило получить представление о характере и интенсивности развития трещиноватости минералов на разных этапах посткристаллизационной истории изучавшихся пород.

Ботогольский щелочной массив

Включения в нефелине

Минералотермометрическими методами изучался нефелин всех разновидностей нефелинсодержащих пород Ботогольского массива.

Для исследований использовался свежий, наиболее прозрачный нефелин как из крупнозернистых пегматоидных, так и из средне- и мелкозернистых нефелиновых сиенитов.

Включения в нефелине Ботогольского массива представлены двумя генетическими типами: 1) первичными включениями и 2) вторичными включениями.

Первичные включения, в свою очередь, подразделяются на три типа: а) твердые кристаллические, б) затвердевшие раскристаллизованные и в) двухфазовые газовой-жидкие.

Твердые кристаллические включения количественно преобладают над всеми другими типами включений.

Основную массу первичных твердых кристаллических включений составляют очень тонкие хорошо ограниченные призматические и игольчатые кристаллики зеленого клинопироксена (рис. 8) с показателями преломления $N_{g'} = 1,738$, $N_{p'} = 1,718$. Наряду с пироксеном в нефелине в виде твердых включений встречаются правильные кубические кристаллы рудного минерала и овальные зерна кальцита.

Включения пироксена ориентированы параллельно оси L_6 минерала-хозяина. Подобная ориентировка образуется лишь в процессе кристаллизации минерала и обуславливает первичность твердых включений (Базаров, 1965). В пластинках из пегматоидных нефелиновых сиенитов были встречены сечения кристаллов нефелина, перпендикулярные L_6 , в которых наблюдалось четкое зональное расположение участков, обогащенных включениями пироксена (типичные фантомы роста кристалла). Это обстоятельство является непосредственным свидетельством захвата кристалликов клинопироксена во время кристаллизации нефелина.

Размеры основной массы твердых кристаллических включений составляют сотые доли миллиметра в длину и тысячные доли в поперечнике.

Затвердевшие раскристаллизованные включения встречаются сравнительно редко. Они имеют вид многофазовых включений неправильной формы с небольшой газовой фазой (рис. 9). Включения не имеют видимой закономерной ориентировки. Размеры включений не превышают 0,03 мм в поперечнике. При нагревании до 1200°С изменений в фазовых соотношениях не наблюдалось.

Двухфазовые газопо-жидкие включения составляют около 10% от общего числа газопо-жидких включений в нефелине Бото-гольского массива. Они расположены среди первичных твердых кристаллических включений и, как правило, ориентированы параллельно последним.

Форма включений, за очень редким исключением, соответствует кристаллографическим особенностям нефелина, т. е. полость включения представляет собой «негативный» кристалл нефелина. В сечениях, параллельных оси L_6 нефелина, включения имеют вид удлинённых гексагональных призм. Иногда включения с одной стороны имеют ступенчатые очертания, обусловленные взаимным сочетанием негативных граней призмы и пирамиды (рис. 10, а).

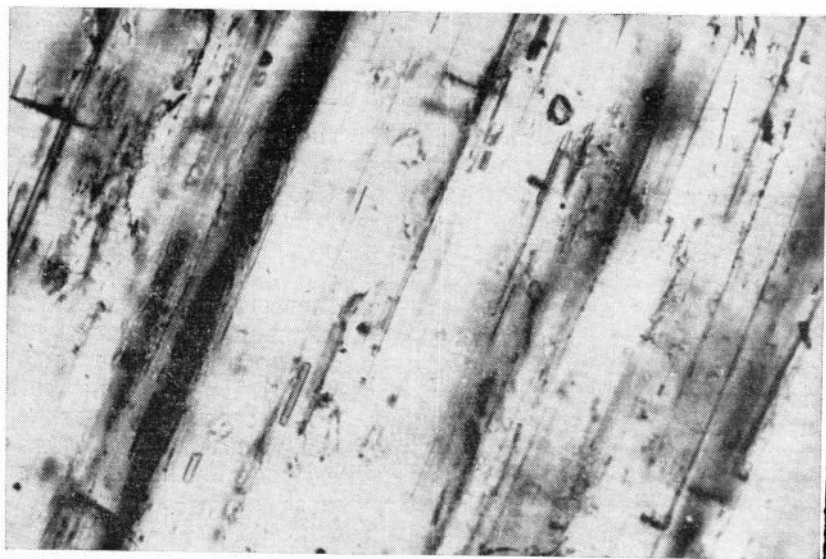


Рис. 8. Твердые кристаллические включения в нефелине (Ботогол).
Увел. 600

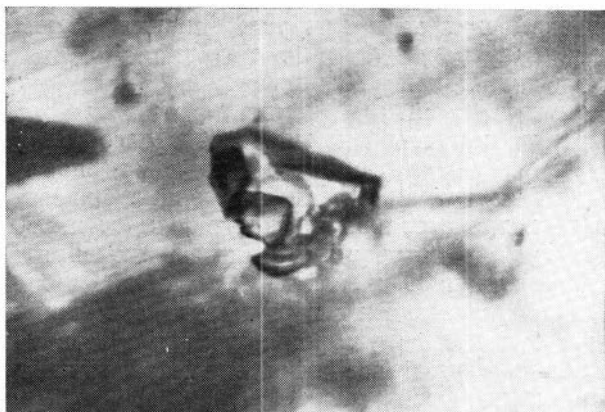


Рис. 9. Затвердевшие раскристаллизованные включения в нефелине (Ботогол). Увел. 800

В сечениях, перпендикулярных длинной оси нефелина, включения имеют вид правильных пяти- и шестиугольников.

Фазовые соотношения газ:жидкость колеблются в сравнительно узких пределах от 45:55 до 55:45. Рассчитанные плотности гомогенных растворов во включениях (без учета солей) составляют интервал от 0,55 до 0,65 г/см³. С учетом солей до 0,08 г/см³.

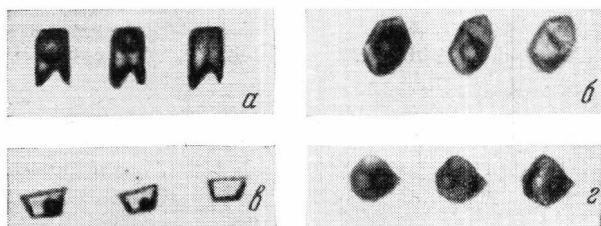


Рис. 10. Включения в нефелине. Увел. 1000
 а—первичное ($t_{\text{ГОМ}}^{\circ} = 750^{\circ} \text{C}$); б—вторичные двухфазовые; в—вторичное трехфазовое

Размеры первичных газовой-жидких включений не превышают 0,003 мм. Первичные газовой-жидкие включения гомогенизируются в интервале температур 850—680°С. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу.

Отличительной особенностью первичных газовой-жидких включений (от вторичных) является перераспределение вещества

внутри включений при температурах, близких к температуре гомогенизации. Перераспределение материала проявляется в изменении первоначальной (до нагревания) формы включения. При охлаждении до комнатной температуры после гомогенизации конфигурация включений не меняется. Повторные гомогенизации осуществляются при одних и тех же температурах без дополнительного изменения формы включения. Описанное явление никогда не встречается во вторичных включениях. Возврат к первоначальной (до нагревания) форме включения не происходит и по прошествии 30 дней с момента нагревания включения. Растворы, содержащиеся в первичных газовой-жидких включениях, имеют более высокую концентрацию растворенных солей по сравнению с наиболее высокотемпературными вторичными включениями.

Вторичные включения в нефелине представлены двумя типами: а) двухфазовыми газовой-жидкими и б) трехфазовыми включениями.

Двухфазовые газовой-жидкие включения составляют основную массу всех вторичных включений. Они ориентированы параллельно плоскостям спайности в нефелине по гексагональной призме (1010) и пинакoidу (0001); часто вторичные газовой-жидкие включения приурочены к плоскостям залеченных трещин, секущих нефелин. Форма включений — негативные кристаллы, иногда не полностью ограненные (рис. 10, б, в). Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются от 5 : 95 до 40 : 60%. Размеры включений не превышают 0,01 мм в поперечнике. Гомогенизация включений осуществляется в жидкую фазу. Интервал температур гомогенизации от 660 до 120°С. Примерно 70% двухфазовых вторичных включений гомогенизируются в интервале температур 500—400°С.

Трехфазовые включения составляют около 20% общего числа газовой-жидких включений. По своей морфологии, соотношениям газ — жидкость и расположению они ничем не отличаются от вторичных двухфазовых включений. Отличие представляет лишь присутствие третьей, твердой, фазы, представленной прозрачным бесцветным кристалликом кубической, а чаще параллелепипедальной формы. Твердая фаза составляет не более 10—15% объема включения (рис. 10, г). Обычно твердая фаза растворяется в интервале от 150 до 200°С, а в включениях, гомогенизирующихся в температурном интервале 560—520°С, — при температуре от 300 до 330°С.

Были встречены включения, в которых твердая фаза представлена мельчайшим черным кристалликом (очевидно, рудным минералом), не растворяющимся даже после гомогенизации.

Трехфазовые включения гомогенизируются в жидкую фазу при температурах от 560 до 120°С.

Среди минералов, слагающих нефелиновые сиениты Ботогольского и Нюрганского массивов, наибольшим распространением пользуются кали-натровые полевые шпаты (ортоклаз и микроклин-микропертиты). Наряду с «первичными» (кристаллизовавшимися из расплава) кали-натровыми полевыми шпатами в породах Ботогольского массива присутствует альбит, образующий венцовые структуры по периферии зерен калишпата. По мнению В. П. Костюка (1964), упомянутый альбит образовался в процессе постмагматической наложенной альбитизации.

Нам лишь в двух случаях (из нескольких сот) удалось провести гомогенизацию герметичных включений в кали-натровом полевом шпате. Включения вторичные, двухфазовые, округлой формы. Размеры включений менее 0,001 мм в поперечнике. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу. Полученные температуры гомогенизации двух включений составляют 600 и 620° С. Представляется несомненным, что температура кристаллизации кали-натровых полевых шпатов была выше 620° С.

Некоторое представление о возможных пределах температур кристаллизации кали-натровых полевых шпатов может быть также получено при сопоставлении имеющихся температур с приведенными в литературе результатами экспериментальных исследований.

Боуэн и Таттл в 1952 г. экспериментально установили, что кали-натровые полевые шпаты при высоких температурах образуют непрерывные твердые растворы с минимумом в точке плавления. При понижении температуры смесимость компонентов в кристаллической фазе становится ограниченной. Находясь в кристаллическом состоянии, твердые растворы распадаются на составляющие компоненты.

В настоящее время многие исследователи стремятся использовать температуру распада кали-натровых полевых шпатов (микропертиты) в качестве «геологического термометра» (Сленсер, 1952; Шерер, 1952; Боуэн и Таттл, 1952; Лавес, 1956; Иодер, 1963; Орвилл, 1963 и многие другие).

При экспериментах с сухими расплавами в системе $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — SiO_2 Д. Ф. Шерером (1952) получена точка минимума кристаллизации для кали-натровых полевых шпатов. Температура составила $1063 \pm 3^\circ$, что соответствовало составу 35% KAlSi_3O_8 и 65% $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$.

Примерно при том же составе (30% ортоклаза, 70% альбита), но при добавлении воды температура кристаллизации кали-натровых полевых шпатов снижается. Для системы с водой точка минимума сдвигается к 70% натрового компонента. При давлении водяного пара в 1000 атм точка минимума снижается до 843° С, а при 2000 атм до 770° С (Боуэн, Таттл, 1952). Распад

твердого раствора во всех вышеперечисленных случаях происходит при одной и той же температуре, которая, судя по диаграммам Боуэна и Таттла (1952), составляет 660°C .

Ф. Лавес (1956), изучавший систему природных полевых шпатов, предложил диаграмму, устанавливающую фазовые соотношения в системе ортоклаз—альбит. Температура, при которой начинается распад (на кривой сольвуса), составляет 680°C .

Х. С. Иодер и др. (1963), изучавшие систему тройных полевых шпатов при давлении водяного пара 5000 бар , для разреза альбит—ортоклаз получили максимум на кривой сольвуса при температуре 715°C . Учитывая данные Боуэна и Таттла, указанные выше авторы считают, что «давление повышает температуру максимума кривой сольвуса примерно на $14^{\circ}\text{C}/1000\text{ бар}$ ».

П. М. Орвил (1963) проводил эксперименты при давлении водяного пара 2000 бар в интервале температур от 300 до 700°C . В систему искусственных смесей KAlSi_3O_8 — $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ было добавлено более 2 мол. % щелочного хлорида. В такой системе при 700°C существует полная смесимость кали-натровых полевых шпатов, т. е. в системе присутствуют одна твердая фаза и раствор хлорида. При температуре 600°C наблюдается нарушение гомогенности твердой фазы. При сопоставлении всех имеющихся данных (с учетом полученного нами давления летучих) за нижний предел кристаллизации изучавшихся кали-натровых полевых шпатов (Заварицкий, Соболев, 1961) можно принять температуру 700 — 660°C , устанавливаемую по распаду твердых растворов.

Пироксен

Изучение включений в пироксенах Ботогольских нефелиновых сиенитов было весьма затруднено их чрезвычайно густой окраской. Зерна пироксенов становятся полупрозрачными лишь в препаратах-пластинках толщиной менее $0,01\text{ мм}$. Последнее обстоятельство наряду с техническими трудностями (хрупкость пластинки указанной толщины) привело к ограничению размера герметичных включений.

При самых тщательных поисках в клинопироксенах типичных нефелиновых сиенитов нам не удалось обнаружить включений достаточного размера для определения температур. Лишь в пегматоидных разновидностях нефелиновых сиенитов, где размеры кристаллов пироксена достигают величины нескольких сантиметров, были встречены достаточно крупные двухфазовые включения и определена температура их гомогенизации.

Форма встреченных включений длиннопризматическая, часто трубчатая. В пределах залеченных секущих трещин включения обычно плоские с амбовидными очертаниями. Основная часть

включений ориентирована параллельно спайности пироксена. Фазовые соотношения газ:жидкость колеблются в широких пределах от 45:55 до 10:90.

Размеры включений не превышают 0,005 мм по удлинению. Гомогенизация всех включений осуществляется в жидкую фазу в интервале температур от 660 до 120° С. Необходимо отметить, что плоские включения неправильной формы, приуроченные к

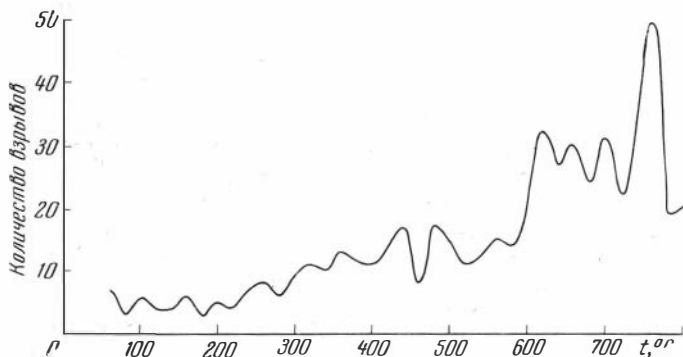


Рис. 11. Кривая частоты взрывов включений в пироксене при нагревании

залеченным трещинам, гомогенизируются в интервале температур 230—120° С.

Трубчатые включения гомогенизируются в интервале температур 410—280° С; призматические частично или полностью ограниченные — в интервале 660—470° С. Кроме описанных выше вторичных включений, была встречена большая группа включений, не связанных с секущими трещинами и трещинами спайности. Размеры включений менее 0,001 мм. Гомогенизация этих включений не могла быть проведена вследствие малых размеров. При прогреве изучавшегося клинопироксена в вакууме на термобарическом регистраторе (Долгов, Серебренников, 1965) на кривой максимальный пик располагается в интервале 700—800° С (рис. 11).

По нашему мнению, существование максимума взрывов в области 700—800° С позволяет с уверенностью судить о нижнем температурном пределе кристаллизации пироксена¹.

¹ Термобарическая установка Ю. А. Долгова и А. И. Серебренникова в отличие от существующих термозвуковых установок фиксирует изменение давления в системе при взрыве включений (Долгов, Серебренников, 1965). Термобарический метод не имеет большинства недостатков термозвукового метода.

Выяснение физико-химических условий кристаллизации кальцита (карбонатов) в щелочных породах представляет значительный интерес и в последние годы все более привлекает внимание различных исследователей (Уайли, Таттл, 1963 и многие др.). Этот интерес связан с решением генетических вопросов формирования щелочных пород и с проблемами генезиса карбонатитов.

Кальцит в породах Ботогольского массива встречается в виде пойкилитовых вкрапленников в нефелине, а также в виде прожилков и скоплений неправильной формы в зонах графитизации.

В процессе изучения включений в кальците мы столкнулись с непреодолимыми трудностями. При нагревании в термокамерах препараты-пластинки, изготовленные из отдельных зерен кальцита (из типичных нефелиновых сиенитов), при достижении $280\text{--}300^\circ\text{C}$ растрескивались по спайности задолго до гомогенизации находящихся в них включений. Небольшое дальнейшее повышение температуры приводило к полному разрушению пластинки. Многократные попытки (несколько сотен) гомогенизации высокотемпературных включений в пластинках из отдельных зерен кальцита оказались безуспешными. Лишь при изучении тонких препаратов-пластинок (толщина, близкая к толщине шлифа), изготовленных из клинопироксена пегматоидной пироксен-полевошпатовой породы, в мелких овальных пойкилитовых вростках кальцита (до 1 мм в поперечнике) представилось возможным гомогенизировать вторичные среднетемпературные газовой-жидкие включения.

В пойкилитовых зернах кальцита обнаружены газовой-жидкие включения двух типов: 1) двухфазовые и 2) трехфазовые. Оба типа включений имеют ромбоэдрическую форму (рис. 12, а). Размеры включений менее $0,003\text{ мм}$ в поперечнике. Фазовые соотношения газ : жидкость колеблются в пределах $50:50\text{--}30:70$. В трехфазовых включениях твердая фаза представлена бесцветным кристалликом кубической или параллелепидальной формы. Растворение твердой фазы происходит до полной гомогенизации включения. Гомогенизация средних и низкотемпературных двухфазовых включений осуществляется в жидкую фазу в интервале температур от 500 до 120°C .

Гомогенизация трехфазовых включений осуществляется в жидкую фазу в температурном интервале от 345 до 180°C .

Встречающиеся высокотемпературные включения (фазовые соотношения, близкие к критическим) взрывались задолго до гомогенизации. Судя по фазовым соотношениям, при температуре $450\text{--}500^\circ$ их гомогенизация должна была бы осуществиться в жидкую фазу при более высокой температуре.

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что температура кристаллизации изучавшегося кальцита была существенно

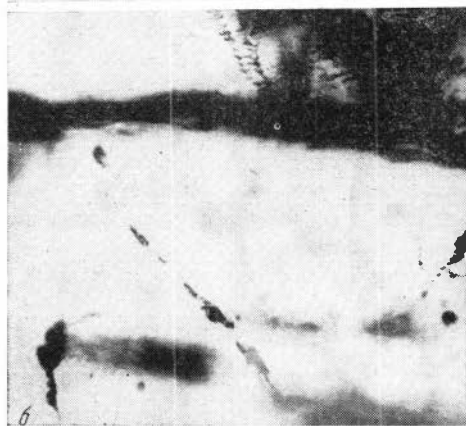
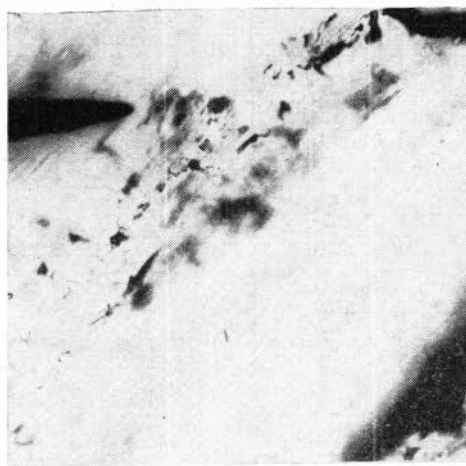
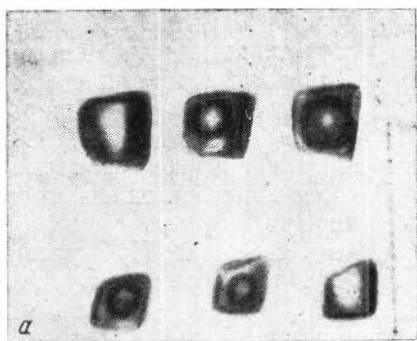


Рис. 12. Вторичные газожидкие включения в высокотемпературном кальците (а) и в гранате (б). Ботогол. Увел. 1200

выше 500°C (не менее чем $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$). При температуре $450\text{--}500^{\circ}$ соотношение фаз газ:жидкость было аналогичным соотношениям фаз во включениях в нефелине при этой же температуре. Размеры газового пузыря при температуре 500° составляли не менее $30\text{--}35\%$ объема включения. Наблюдения за изменением поведения соотношения фаз показывают неуклонное, постепенное увеличение объема, занимаемого жидкой фазой, и уменьшение объема, занимаемого газовой фазой; подобное поведение включений и в нефелине. Представляется возможным тождество растворов в высокотемпературных включениях в кальците и нефелине.

Помимо температур гомогенизации среднетемпературных включений и характера изменения соотношения фаз в высокотемпературных включениях, некоторое представление о температурных условиях кристаллизации кальцита можно получить при сопоставлении ряда следующих фактов: наличие каплевидных мельчайших пойкилитовых включений (тип: твердые, кристаллические) кальцита в нефелине и пироксене, обрастание включений кальцита каймой из биотита, амфибола, реже, клинопироксена; образование «крупных» кристаллов биотита вокруг кальцита, содержащего вкрапленники рудного минерала, и т. д. Образование твердых кристаллических включений кальцита в минерал-хозяине (нефелин, пироксен) возможно лишь в процессе кристаллизации минерала-хозяина.

По нашему мнению, все эти обстоятельства позволяют однозначно решить вопрос о природе пойкилитовых вкрапленников — зерен кальцита.

Отметим здесь, что полученные нами температуры гомогенизации высокотемпературных включений в нефелине превышают 700°C . По данным М. С. Питерсона, кальцит плавится при 900°C и совместном давлении воды и CO_2 , равном 50 бар . П. И. Уайли и О. Ф. Таттл (1963) показали, что карбонатитовые магмы остаются нацело жидкими при давлении летучих 2000 бар и температуре 700°C . Давление летучих при кристаллизации нефелина, полученное нами, составляет более 1500 атм , температура начала кристаллизации нефелина 850°C . При этих условиях, по нашему мнению, вполне возможно существование карбонатного расплава.

Наряду с приведенными выше исследованиями нами была предпринята попытка определения температуры образования кальцита косвенным путем — по максимальной температуре гомогенизации включений в канкрините. В ботогольских породах канкринит образуется как реакционный минерал за счет нефелина и кальцита. Процесс этот настолько отчетлив, что не вызывает сомнения. Температура образования кальцита должна быть заведомо выше таковой для канкринита. В канкрините были обнаружены двухфазовые газовой-жидкие включения, приуроченные

к трещинам, т. е. заведомо вторичные. Максимальная температура гомогенизации этих включений составила 400°C .

Наряду с кальцитом, описанным выше, был изучен кальцит из зон графитизации. Включения в кальците из зон графитизации преимущественно плоские, двух- и трехфазовые, иногда многофазовые. Контуры включений образованы прямыми линиями, параллельными направлениям спайности кальцита. Иногда наблюдаются колеччатые или Т-образные формы. Фазовые соотношения изменяются в широких пределах. Включения относительно крупные — до несколько сотых долей миллиметра.

Максимальные температуры гомогенизации двухфазовых включений 280°C , трех- и многофазовых 240°C .

В ботогольских нефелиновых сиенитах нами выделяется два генетических типа кальцита: а) высокотемпературный, температура образования которого выше 500°C , и б) низкотемпературный с температурой образования около 300°C .

Вопрос о природе кальцита в щелочных породах изучаемого района связан непосредственно с проблемой происхождения щелочных пород. Участие кальцита в процессах формирования комплекса щелочных пород не является случайным.

Полученные результаты изучения включений в нефелине свидетельствуют о магматическом происхождении нефелина. Поскольку захват пойкилитовых первичных включений кальцита нефелином возможен лишь в процессе кристаллизации нефелина, представляется несомненной магматическая природа кальцита.

По реакциям минералообразования, рассчитанным В. П. Костюком (Костюк, Базарова, 1966) для построения мультисистемы, кальцит участвует во всех без исключения реакциях.

Отмеченное ранее относительно слабое влияние интрузий гранитоидов района на вмещающие известняки, отсутствие сколь угодно существенного по масштабам мета- и биметасоматоза на контактах нефелиновых сиенитов вынуждают полагать, что известняки вмещающей монгошинской свиты не являлись источником карбонатного материала в нефелиновых сиенитах.

Для щелочных пород Ботогола и Нюргана, содержащих избыточное количество извести, источник ее следует искать либо в возможной ассимиляции известняков магматическим расплавом в более глубоких (порядка 10—12 км и более) частях стратиграфического разреза, либо в изначальном содержании в расплаве больших количеств СаО.

Гранат

В породах Ботогольского массива минералотермометрическими методами изучались гранаты приконтактных зон нефелиновых сиенитов (контакт с известняками) и гранаты типичных метасоматических пород.

В эндоконтактных участках нефелиновых сиенитов (контакт с известняками) гранат составляет до 40—50% объема породы. Ксеноморфные зерна граната, располагаясь бессистемно среди минералов нефелиновых сиенитов (кали-натровый полевой шпат, нефелин, пироксен), достигают в среднем 3—4 см в поперечнике. Цвет граната темно-бурый с красноватым оттенком в тонких сколах. Показатель преломления 1,800, уд. вес 3,699.

Гранат типично метасоматических пород ассоциирует с клинопироксеном, волластонитом и иногда с пренитом. Он имеет здесь значительно более светлую окраску и представлен сравнительно мелкими зернами, размеры которых не превышают 0,3 см в поперечнике.

Включения в гранатах нефелиновых сиенитов и метасоматических пород представлены двумя типами: 1) двухфазовые газо-жидкие; 2) трехфазовые газо-жидкие.

Оба вида включений встречаются лишь в пределах залеченных трещин. Включения в большинстве случаев плоские, неправильной формы (рис. 12, б). Фазовые соотношения газ:жидкость колеблются в широких пределах: от 10:90 до 45:55 и 80:10 до 45:30.

Твердая фаза представлена обычно прозрачным кристалликом кубической формы, иногда бесформенным агрегатом, гомогенизирующимися до исчезновения газовой фазы.

Размеры включений не более 0,005 мм. В гранатах неоднократно отмечалось явление «расшнуровки» включений.

Интервал температур гомогенизации от 400 до 100°С. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу. Приуроченность включений к залеченным трещинам позволяет отнести их к категории вторичных включений. Представляется несомненным, что температура образования описанных гранатов должна быть выше максимальной температуры гомогенизации вторичных включений.

Волластонит

Изучался волластонит из скарированных участков экзоконтактов щелочных пород и волластонитовых прожилков. Малая прозрачность изучавшегося волластонита существенно затрудняла проведение минералотермометрического анализа.

Встреченные в волластоните включения разнообразны по морфологии, фазовому составу и соотношениям фаз. Выделяются включения трубчатой, удлиненно-призматической ограниченной формы. Размеры включений не превышают 0,002 мм. Включения, как правило, ориентированы параллельно длинной оси кристаллов волластонита. Выделить среди встреченных включений первичные не представилось возможным. Соотношение фаз газ:жидкость во включениях колеблется в широких

пределах — от 40 : 60 до 20 : 80. Наряду с двухфазовыми включениями в волластоните присутствуют и трехфазовые. Третья фаза представлена кубическим или параллелепipedальным прозрачным кристалликом (NaCl), составляющим до 10% объема включения. Концентрация солей для трехфазовых включений колеблется от 29 до 36 вес. % (по NaCl). Двух- и трехфазовые включения гомогенизируются в интервале температур 520—150°С.

Представляется очевидным, что температура начала кристаллизации волластонита в описанном случае была не ниже 520°С. Отсутствие критериев первичности включений в волластоните не позволяет выделить вероятный нижний предел кристаллизации волластонита.

Нюрганский щелочной массив

В нефелине из нефелиновых сиенитов Нюрганского массива выделяются два генетических типа включений: первичные и вторичные. Первичные, в свою очередь, можно подразделить на: 1) первичные кристаллические, 2) первичные затвердевшие раскристаллизованные и 3) первичные газовой-жидкие.

Первичные кристаллические включения составляют около 10% от общего количества включений. Они представлены главным образом тонкими удлинёнными буровато-зелеными кристаллами, диагностика которых не проводилась ввиду малых размеров (0,005 мм и менее), ориентированными параллельно оси L_6 нефелина.

Первичные затвердевшие раскристаллизованные включения обычно многофазовые: соотношения твердые фазы : газ измеряются от 98 : 2 до 95 : 5%. При нагревании до 1200° изменений фазовых соотношений не обнаружено. Размеры включений около 0,01 мм в поперечнике (рис. 13).

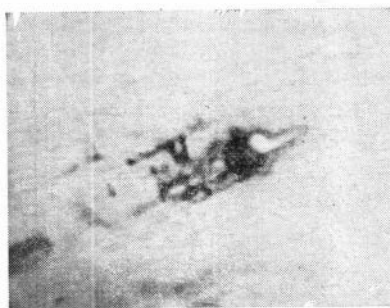


Рис. 13. Первичное затвердевшее раскристаллизованное включение в нефелине (Нюрган). Увел. 600

Первичные газовой-жидкие включения составляют около 40% от общего количества газовой-жидких включений. Они расположены среди твердых включений, ориентированы параллельно последним и представляют собой (рис. 14) трехфазовые включения с соотношением газ : жидкость, изменяющимся от 60 : 40 до 45 : 55. Твердая фаза представлена параллелепipedальным бесцветным кристаллом, занимающим не более 10% объема

включения. Включения имеют длиннопризматическую, иногда близкую к трубчатой форму. Их размеры не превышают 0,003 мм в длину. Гомогенизация включений осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 850—700°С. Растворение твердой фазы происходит при температурах от 550 до 480°С. При нагревании препаратов нефелина под микроскопом при температурах, близких к температурам гомогенизации в первичных включениях, наблюдаются явления растворения и переот-

Таблица 6

Порода	Минерал	Тип включений	Интервал температур гомогенизаций, °С	Агрегатное состояние
<i>Ботогольский щелочной массив</i>				
Типичный нефелиновый сиенит	Нефелин	Первичн.	—	Расплав
	»	»	850—680	Жидкость
Пегматоидный нефелиновый сиенит	»	Вторичн.	660—120	»
	»	Первичн.	—	Расплав
Среднезернистая существенно нефелиновая порода	»	»	840—680	Жидкость
	»	Вторичн.	640—120	»
Трахитоидный нефелиновый сиенит	»	Первичн.	—	Расплав
	»	»	810—700	Жидкость
Пегматоидная пироксен-полевошпатовая порода	»	Вторичн.	660—120	»
	»	Первичн.	—	Расплав
Нефелиновый сиенит приконтактовой зоны с известняком	»	»	850—680	Жидкость
	»	Вторичн.	660—140	»
Кальцитовые прожилки и обособления из зон графитизации	Пироксен	Первичн.	800—700	»
	»	Вторичн.	660—470	»
	»	»	410—280	»
	»	»	230—120	»
	Кальцит	»	500—400	»
Пегматоидный нефелиновый сиенит	»	»	345—120	»
	Гранат	»	400—100	»
Волластонитовый прожилок	Кальцит	Первичн.	280—240	»
	»	Вторичн.	240—120	»
Канкринит	»	»	400—120	»
	Волластонит	Первичн.	520—450	»
Типичные нефелиновые сиениты	»	Вторичн.	400—100	»
	Нефелин	Первичн.	—	Расплав
Нюрганский щелочной массив	»	»	850—700	Жидкость
	»	Вторичн.	680—480	»
		»	400—100	»

ложения материала на стенках включений, аналогичные описанным для включений в нефелинах ботогольских пород.

Вторичные включения двух- и трехфазовые газово-жидкие обычно ориентированы параллельно спайности нефелина по призме (1010) и пинаконду (0001). Форма включений в большинстве случаев — ограненные «негативные» кристаллы. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются от 40 : 60 до 15 : 85.

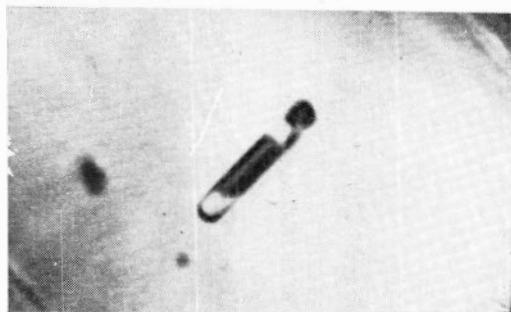


Рис. 14. Первичное газово-жидкое включение в нефелине ($t_{\text{гом}}=850^{\circ}\text{C}$). Увел. 1000

Большинство вторичных включений гомогенизируется в жидкую фазу в интервале температур $680\text{—}480^{\circ}\text{C}$. Это в основном трехфазовые включения. Двухфазовые включения гомогенизируются в интервале температур $400\text{—}100^{\circ}\text{C}$.

Результаты минералотермометрического изучения минералов щелочных пород Ботогольского и Нюрганского массивов приводятся в табл. 6.

Ловозерский щелочной массив

В породах дифференцированного комплекса Ловозерского щелочного массива (уртитах, фойяитах и мезократовых люавритах) изучались включения в нефелине из образцов, полученных из керна скв. 302 (интервал глубин от 43 до 320 м). Образцы пород были любезно предоставлены Я. М. Фейгиным.

В нефелине уррита, фойяита и люаврита были встречены включения двух генетических типов: первичные и вторичные. Первичные в свою очередь представлены: а) кристаллическими твердыми включениями в виде мелких удлиненных кристаллов эгирина, акцессорных и рудных минералов; б) затвердевшими раскристаллизованными включениями, представляющими собой реликты расплава, захваченного в процессе кристаллизации нефелина; в) газово-жидкими включениями.

Наибольший интерес для термометрических целей представляют включения двух последних типов.

Первичные затвердевшие раскристаллизованные включения имеют неправильную форму, бухтообразные очертания (рис. 15). Размеры включений достигают 0,03 мм в поперечнике. Фазовый состав включений — 4 твердые фазы, отличающиеся показателями преломления, и газ (объем газового пузырька составляет до 3—5% объема включения). Форма пузырька разнообразная, чаще неправильная. При нагревании до 1200°С фазовых изменений во включении не наблюдается.

Первичные газово-жидкие двухфазовые включения в нефелине каждой из изучавшихся пород обладают некоторыми индивидуальными особенностями, обусловленными, по-видимому, различиями в условиях их формирования.

Первичные газово-жидкие включения в нефелине пород дифференцированного комплекса Ловозерского щелочного массива (особенно уртитов и фойяитов) по своим размерам, частоте встречаемости, четкости фазовых границ, герметичности явились наиболее благоприятным материалом для проведения комплекса минералотермометрических исследований: замеров температур гомогенизации, криометрических исследований определения состава и концентрации растворов в индивидуальных включениях, определения давления, проведения газового анализа индивидуальных включений.

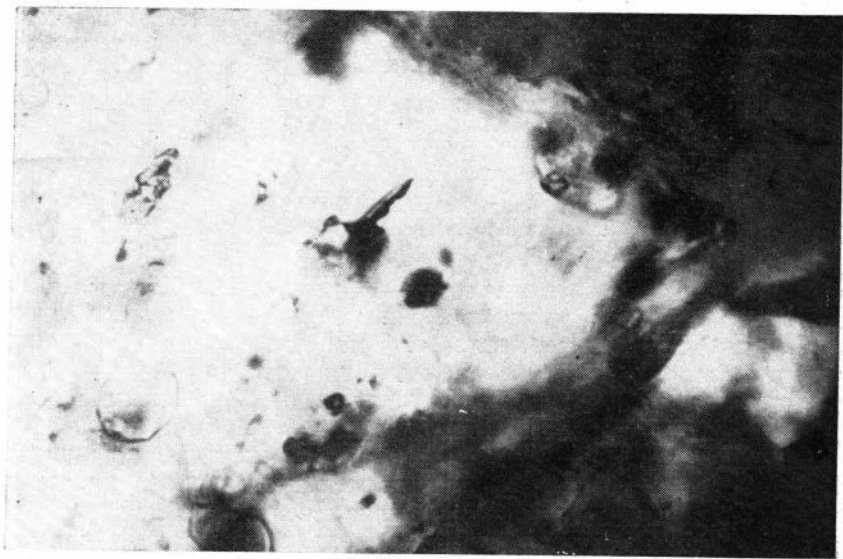


Рис. 15. Затвердевшее раскристаллизованное включение в нефелине (внизу первичное газово-жидкое). Уртит. Увел. 800

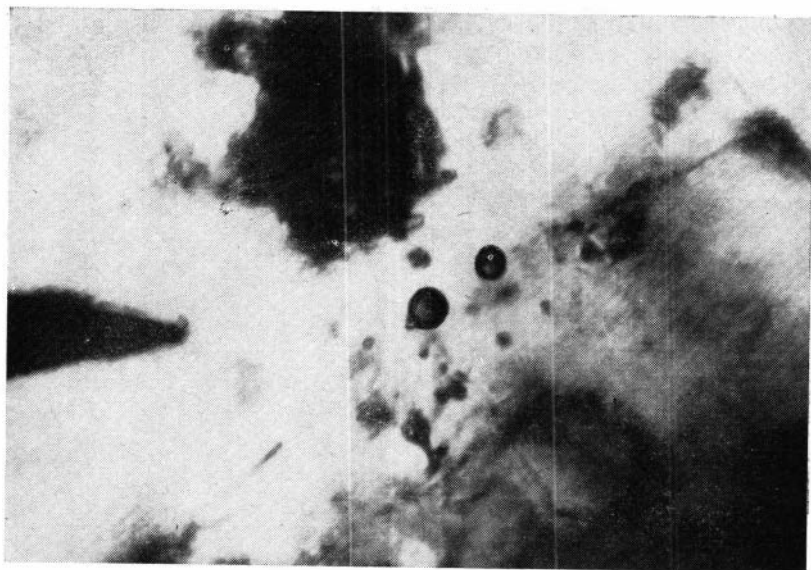


Рис. 16. Группа первичных газовой-жидких включений ($t^{\circ}_{\text{гом}} = 980^{\circ}\text{C}$). Уртит.
Увел. 800

Первичные газовой-жидкие включения в нефелине уррита составляют около 30% общего числа газовой-жидких включений.

Размеры включений составляют 0,002—0,01 мм в поперечнике. Включения имеют, как правило, ограниченную, несколько удлиненную форму, иногда встречаются частично ограниченные (рис. 16—18).

Распределение включений в объеме кристаллов нефелина более или менее равномерное. Фазовые соотношения газ : жидкость колеблются в пределах от 45 : 55 до 65 : 35. Ориентировка первичных включений отсутствует. Иногда во включениях обнаруживается твердая фаза, представленная небольшим (до 3% объема включения) черным кристалликом кубической или параллелепипедальной формы. Твердая фаза растворяется нацело при температурах, близких к температурам гомогенизации. При температурах, близких к температурам гомогенизации, отмечается перераспределение материала, слагающего стенки включения. Форма включения существенно меняется.

Температуры гомогенизации первичных двухфазовых включений составляют интервал от 810 до 980°C. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу.

Первичные газовой-жидкие включения в нефелине фоййита составляют 8—10% общего числа газовой-жидких включений. Обычно они имеют неправильную или ограниченную форму

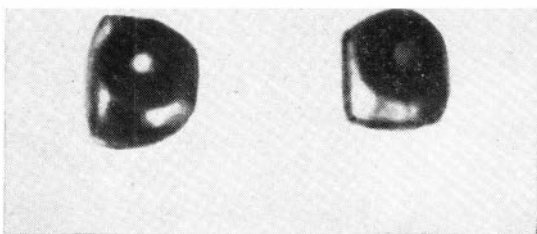


Рис. 17. Первичные газожидкие включения в нефелине ($t_{\text{гом}}^{\circ} = 950^{\circ} \text{C}$). Уртит. Увел. 800

(рис. 19). Размеры включений достигают 0,01—0,02 мм. Ориентировка включений отсутствует. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу в температурном интервале $740\text{—}700^{\circ} \text{C}$.

Вторичные включения в нефелине изучающихся пород дифференцированного комплекса (уртите и фойяите) разнообразны по морфологии, фазовым соотношениям и составу. Выделяются следующие типы включений: а) двухфазовые газожидкие, б) двухфазовые жидкогазовые, в) трехфазовые, г) существенно газовые включения.

Двухфазовые газожидкие включения составляют около 25% общего числа включений. Включения, как правило, имеют частично или полностью ограниченную форму (рис. 20). Размеры включений достигают 0,02—0,03 мм в поперечнике. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются от 10 : 90 до 45 : 55. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу в следующих интервалах температур: $700\text{—}650$, $610\text{—}445$, $400\text{—}200^{\circ} \text{C}$.

Двухфазовые жидкогазовые включения, составляющие примерно 10% общего числа вторичных включений, разнообразны по морфологии и фазовым соотношениям. Гомогенизация осуществляется в газовую фазу в двух температурных интервалах: $780\text{—}750$ и $400\text{—}300^{\circ} \text{C}$.

Трехфазовые вторичные включения в нефелине уртитов имеют различную морфологию (ограниченные, частично ограниченные, неправильные) (рис. 21—23). Размеры включений достигают 0,1 мм в поперечнике. Твердая фаза представлена черным удлиненным призматическим кристалликом, иногда сростком нескольких кристалликов (рис. 23). Твердая фаза составляет 3—5% объема включения. Растворение твердой фазы происходит иногда до гомогенизации газовой фазы, иногда после, но во всех случаях мгновенно. При охлаждении до комнатной температуры выкристаллизовывающаяся твердая фаза, как

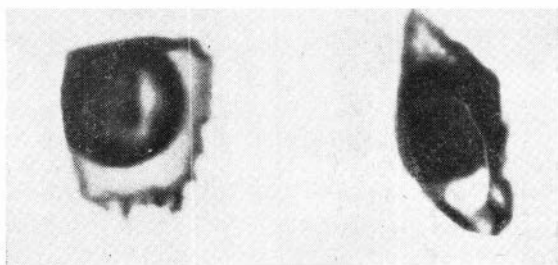


Рис. 18. Первичные газожидкие включения в нефелине ($t_{\text{гом}}^{\circ} = 820^{\circ} \text{C}$). Уртит. Увел. 800

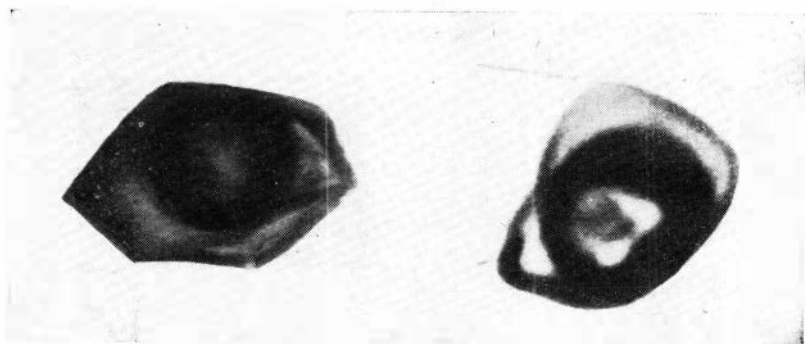


Рис. 19. Первичные газожидкие включения в нефелине. Фойяит. Увел. 800

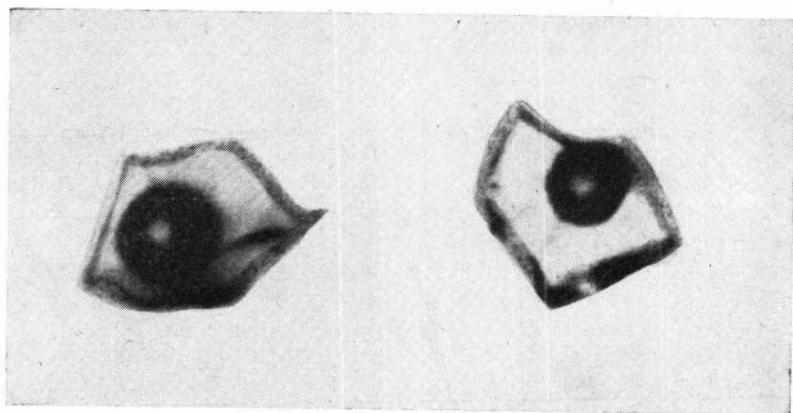


Рис. 20. Вторичные газожидкие включения в нефелине. (Слева — уртит, справа — фойяит). Увел. 800

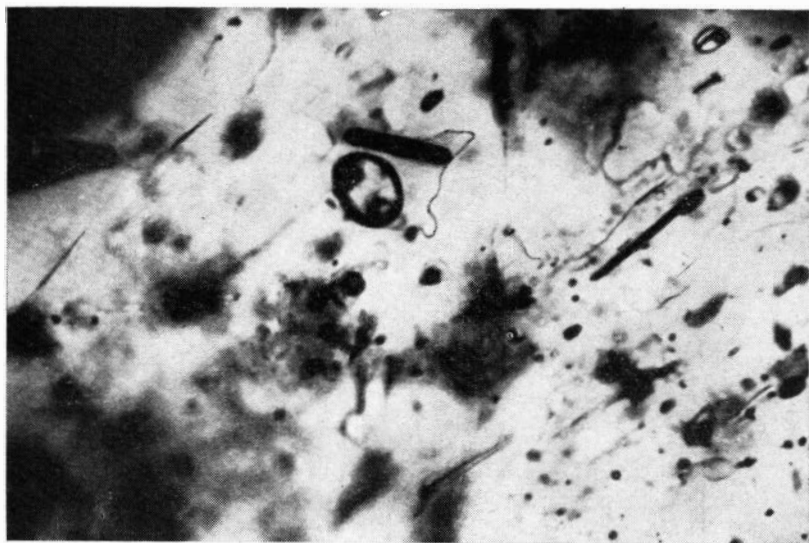


Рис. 21. Вторичные трехфазовые включения в нефелине. Уртит. Увел. 400

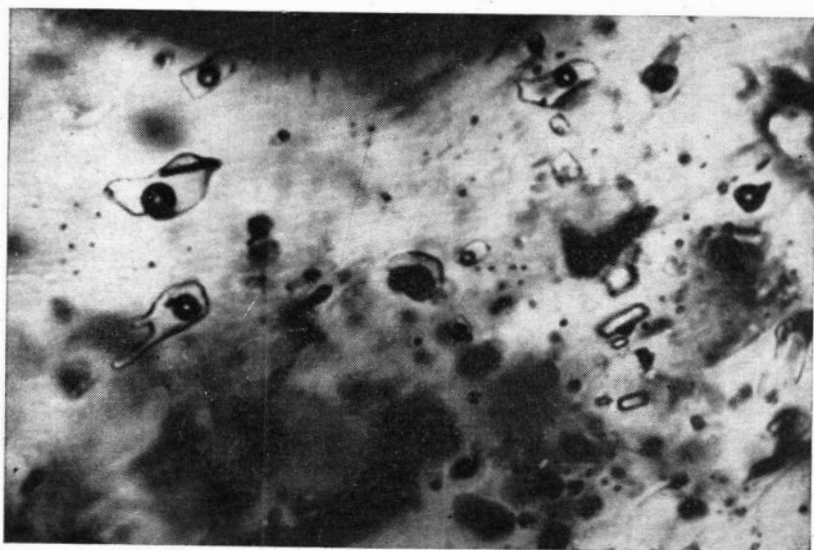


Рис. 22. Вторичные трехфазовые включения в нефелине. Уртит. Увел. 800

Рис. 23. Вторичное трехфазовое включение в нефелине ($t_{\text{гом}} = 700^{\circ}\text{C}$). Уртит. Увел. 600



правильно, меняет габитус на короткопризматический. Гомогенизация трехфазовых включений осуществляется в жидкую фазу в двух интервалах температур: $700-550$ и $440-200^{\circ}\text{C}$.

Существенно газовые включения составляют около 15% общего числа вторичных включений. Форма включений разнообразная (рис. 24). Включения располагаются в пределах залеченных трещин. Размеры включений составляют $0,05-0,08$ мм в поперечнике. Состав газов во включениях углеводородный. Подобные включения в нефелине нефелиновых пород Кольского полуострова описывались ранее И. А. Петерсилье (1964) и С. В. Икорским (1961).

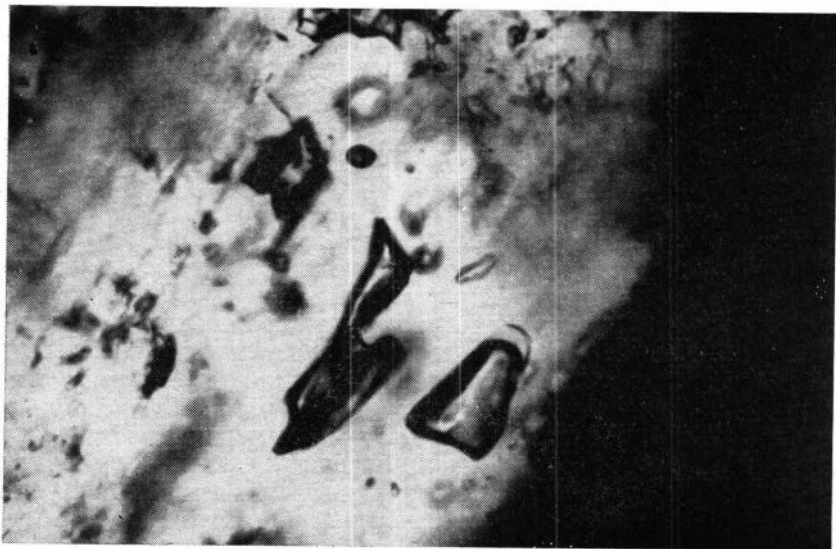


Рис. 24. Существенно газовые (углеводородные) вторичные включения в нефелине. Уртит. Увел. 400

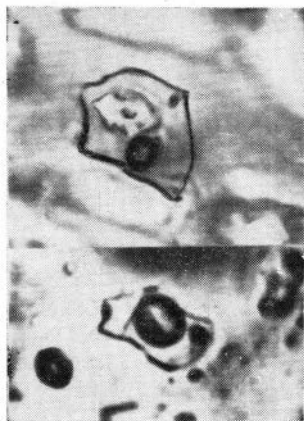


Рис. 25. Вторичные включения в нефелине с двумя различными твердыми фазами. Фойяит.
Увел. 800

в) Гомогенизация трехфазовых включений осуществляется в интервалах температур $660-430$ и $300-200^{\circ}\text{C}$ (для уррита $700-550$ и $445-200^{\circ}\text{C}$). Во включениях, гомогенизирующихся в интервале $660-430^{\circ}\text{C}$, твердая фаза представлена черными кристалликами удлинённого габитуса; во включениях, гомогенизирующихся в интервале $300-200^{\circ}\text{C}$, твердая фаза представлена бесцветным и черным кристалликами (рис. 25). Бесцветная твёрдая фаза в этих включениях занимает больший объём, чем газовая, и растворяется после исчезновения газовой фазы.

В отличие от трехфазовых включений в нефелине уррита в нефелине фойяита преобладают включения с бесцветной кубической твердой фазой.

Включения в нефелине мезократовых лувритов. Основную массу всех включений составляют первичные кристаллические, представленные главным образом кристаллами эгирина и аксессуарными минералами. Большое количество твердых включений в значительной мере затрудняет исследование двухфазовых включений. Максимальные температуры гомогенизации получены для группы двухфазовых включений, гомогенизирующихся в газовую фазу в интервале температур $720-700^{\circ}\text{C}$ (рис. 26). Явление перераспределения материала внутри наиболее высокотемпературных включений (720°C) не наблюдалось. Основная масса изученных газовой-жидких включений гомогенизировалась в жидкую фазу в температурном интервале $400-350^{\circ}\text{C}$. Необходимо отметить, что в нефелине лу-

Вторичные включения в нефелине фойяитов по морфологии, фазовым соотношениям и составу аналогичны вторичным включениям в нефелине уррита (см. рис. 20). Некоторое своеобразие вторичных включений в нефелине уррита заключается в следующем: а) гомогенизация двухфазовых жидко-газовых включений осуществляется в газовую фазу в интервалах температур $675-660$ и $300-230^{\circ}\text{C}$ (для уррита соответствующие интервалы $780-750$ и $400-300^{\circ}\text{C}$).

б) Гомогенизация двухфазовых газовой-жидких включений в жидкую фазу происходит в интервалах температур $600-470$, $410-365$ и $330-260^{\circ}\text{C}$ (для уррита $700-650$, $610-445$, $400-200^{\circ}\text{C}$).

яврита так же, как и в случаях уррита и фойяита, присутствуют существенно газовые углеводородные включения.

При проведении минералотермометрического анализа в эгирине фойяита было встречено и прогомогенизировано лишь небольшое количество (до 40) газово-жидких включений. Включения имеют форму «негативных» кристалликов, ориентированных параллельно удлинению кристаллов эгирина. Гомогенизация включений осуществляется в жидкую фазу при 720, 700° С и более низких температурах.

Для сравнения были исследованы включения в нефелине пегматоидной породы типа хибинита (образцы Минералогического музея ИГиГ) из Хибинского щелочного массива.

Среди многочисленных твердых включений была выделена группа высокотемпературных включений. Включения имеют форму негативных кристаллов. Фазовые соотношения жидкость; газ варьируют от 30 : 70 до 20 : 80. Гомогенизация осуществляется в газовую фазу в интервале температур 720—700° С. Харак-

Таблица 7

Порода	Изучавшийся минерал	Тип включений	Интервал температур гомогенизаций, ° С	Агрегатное состояние
<i>Ловозерский щелочной массив</i>				
Уррит	Нефелин	Первичн.	—	Расплав
	»	»	980—810	Жидкость
	»	Вторичн.	780—750	Газ
	»	»	700—650	Жидкость
	»	»	700—550	»
	»	»	610—445	»
	»	»	445—200	»
	»	»	400—200	»
Фойяит	»	»	400—300	Газ
	»	Первичн.	—	Расплав
	»	»	740—700	Жидкость
	»	Вторичн.	675—660	Газ
	»	»	660—430	Жидкость
	»	»	410—365	»
	»	»	330—260	»
	»	»	300—200	»
Мезократовый луавриг	Пироксен	Первичн. (?)	720—700	»
	Нефелин	Первичн. (?)	720—700	Газ
	»	Вторичн.	400—350	Жидкость
»	»	300—200	Газ	
<i>Хибинский щелочной массив</i>				
Хибиниг	Нефелин	Первичн. (?)	720—700	Газ

терной особенностью этих включений является появление твердой фазы при нагревании до 250—300°С и растворении ее при охлаждении. Твердая фаза представлена бесформенным мало-прозрачным мелкозернистым агрегатом, занимающим до 10—15% объема включения.



Рис. 26. Высокотемпературное жидко-газовое включение в нефелине ($t_{\text{гом}} = 700^{\circ}\text{C}$). Мезократовый луаврит. Увел. 1000

Вторичные газово-жидкие включения в общих чертах похожи на вторичные включения в нефелине пород дифференцированного комплекса Ловозерского массива.

Результаты определения температур гомогенизации сведены в табл. 7.

Уральский миаскитовый массив

В породах миаскитового массива изучались включения в нефелине миаскитов и пегматитов Ильменских гор и канкрините, содалите, пироксене, амфиболе, кальците и пирохлоре пегматитов Вишневых гор.

Образцы исследовавшихся пород автору были любезно предоставлены сотрудниками Минералогического музея ИГиГ СО АН СССР из музейных коллекций.

Результаты минералотермометрического анализа образцов из музея позволили составить представление об условиях формирования пород уральского миаскитового комплекса.

Для исследования отбирались наиболее «свежие» (не подвергшиеся выветриванию) образцы.

Миаскиты Ильменских гор

Первичные включения в нефелине миаскитов представлены: а) твердыми кристаллическими, б) затвердевшими раскристаллизованными и в) газово-жидкими.

Включения первых двух типов в изучавшихся образцах значительно менее многочисленны, чем в нефелине всех ранее описанных пород. Наибольший интерес представляют первичные газопо-жидкие включения. Обычно включения этого типа имеют форму ограненных негативных кристаллов. Отмечается ориентировка удлиненных включений параллельно удлинению минерала-хозяина. Размеры включений не превышают 0,003 мм по наибольшему измерению. Фазовые соотношения газ : жидкость различны — от 45 : 55 до 65 : 35. Отмечается присутствие во включениях одной или нескольких твердых фаз, растворение которых происходит в интервале температур 400—500°С. Гомогенизация включений осуществляется в жидкую фазу в интервале температур от 800 до 950°С. Для включений, гомогенизирующихся при температуре выше 900°С, характерно большое количество твердых фаз, которые при комнатной температуре придают газовой фазе неправильные угловатые очертания (рис. 27). Лишь после некоторого нагревания (до 300—400°С) газовая фаза приобретает свойственные ей овальные контуры.

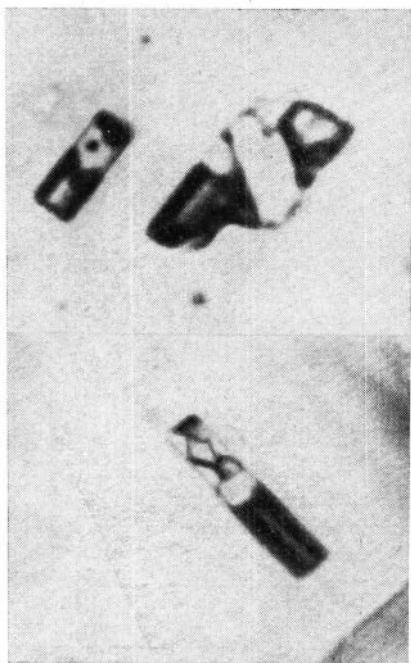


Рис. 27. Первичные газопо-жидкие включения в нефелине ($t_{\text{гом}}^{\circ} = 950^{\circ}\text{C}$). Миаскит. Увел. 800

В первичных газопо-жидких включениях при температурах, близких к температурам гомогенизации, происходит переотложение материала внутри включения, аналогичное описанному для включений в нефелинах Ботогольского, Нюрганского и Ловозерского щелочных массивов.

Вторичные включения разнообразны по форме, фазовым соотношениям и составу. Среди них выделяются: а) двухфазовые газопо-жидкие включения, б) двухфазовые жидко-газовые и в) трехфазовые включения.

Двухфазовые газопо-жидкие включения имеют неправильную или частично ограненную форму. Очень часто наблюдается приуроченность групп включений к залеченным трещинам. Размеры включений достигают 0,01 мм. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются от 10 : 90 до 35 : 65. Гомогенизация

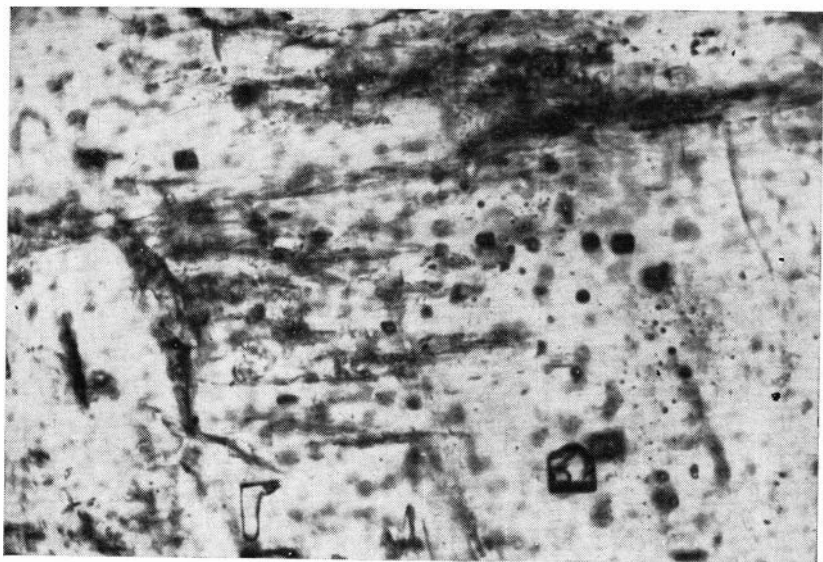


Рис. 28. Вторичные газово-жидкие существенно углекислотные включения. Нефелин. Увел. 400

включений осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 410—180°С.

Своеобразную группу представляют существенно углекислотные (см. газовый анализ) включения, приуроченные, как правило, к некоторым залеченным трещинам. Преобладающей формой для этих включений является форма негативных кристаллов (рис. 28). Размеры включений достигают 0,01 мм в поперечнике. Фазовые соотношения газ : жидкость варьируют от 30 : 70 до 80 : 20. Гомогенизация включений обычно осуществляется в жидкую фазу, значительно реже в газовую в температурном интервале 36—40°С. В нескольких включениях, гомогенизирующихся в жидкость, было отмечено присутствие от одной до трех твердых фаз, представленных бесцветными кристаллами кубической и октаэдрической формы; иногда одна из твердых фаз представлена черным кристалликом кубической формы. Твердые фазы занимают до 20% объема включения и не растворяются даже после исчезновения газовой фазы. Во включениях, гомогенизирующихся в газовую фазу, твердая фаза отмечается значительно реже и в меньшем объеме.

Газово-жидкие включения в нефелине пепматитов (копь 135) представлены двумя генетическими типами: первичными и вторичными.

Первичные включения имеют форму негативных ограниченных кристаллов. Размеры включений достигают 0,005 мм в попереч-

нике. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются в пределах 50 : 50—60 : 40. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 800—700°С. Вероятнее всего, что изучавшийся нефелин является продуктом конечной стадии кристаллизации магматического расплава.

Вторичные включения подразделяются на:

а) двухфазовые газовой-жидкие, аналогичные соответствующему типу включений в нефелине миаскистов. Интервал температур гомогенизации 410—165°С. Они составляют не более 5% общего количества включений в нефелине пегматитов. Имеют форму негативных кристаллов. Фазовые соотношения газ : жидкость варьируют в пределах 70 : 30—80 : 20. Гомогенизация осуществляется в газовую фазу в температурном интервале 500—400°С;

б) трехфазовые включения, которые отличаются от двухфазовых газовой-жидких включений наличием твердой фазы, представленной бесцветным кристалликом кубической или параллелепипедальной формы, растворяющимся при температуре около 300°С.

Вишневые горы

Изучались включения в нефелине из миаскистовых пегматитов (Курочкин лог). Основную массу включений в изучавшемся нефелине представляют двух- и трехфазовые газовой-жидкие существенно углекислотные (см. результаты газового анализа) включения. Они буквально переполняют пластинки нефелина, ориентируясь параллельно оси L_6 и спайности нефелина. Все включения имеют форму негативных кристаллов с хорошей огранкой. Размеры их достигают 0,01—0,03 мм. Фазовые соотношения газ : жидкость варьируют от 5 : 95 до 25 : 75. Гомогенизация включений осуществляется в жидкую фазу при температуре около 36°С. В некоторых включениях присутствует твердая фаза, представленная бесцветными кристаллами кубической, октаэдрической и параллелепипедальной формы.

В нефелине этого типа, кроме вышеописанных включений, были встречены единичные двухфазовые газовой-жидкие включения, гомогенизация которых осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 400—380°С.

Весьма вероятно, что изучавшийся нефелин претерпел значительные постмагматические изменения.

Включения в канкрините из пегматитов (Курочкин лог.). Минералотермометрическими методами были изучены все разновидности канкринита из пегматитов Вишневых гор (от нормального с $N_g - N_p = 0,25$ до типичного сульфат-канкринита, почти не двупреломляющего). Во всех разновидностях канкринита были отмечены газовой-жидкие двух- и трехфазовые включения.

Но осуществить гомогенизацию включений удалось лишь в нормальном канкрините. Во всех прочих случаях канкринит становится непрозрачным уже при нагреве до 120—130° С.

При изучении включений в канкрините была обнаружена группа включений, приуроченных к залеченным трещинам, являющихся, очевидно, вторичными. Гомогенизация включений осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 380—120° С. Очевидно, что температура кристаллизации канкринита должна быть выше 380° С.

Включения в содалите. Нами исследовался содалит из содалитового прожилка в лейкократовой существенно нефелиновой породе (район жилы № 35).

В содалите обнаружено большое количество газовой-жидких включений, отличающихся по морфологии и фазовому составу. Включения имеют неправильную, частично и полностью ограниченную форму (рис. 29). Большая часть включений приурочена к залеченным трещинам.

Различаются двух- и трехфазовые включения. Третья — твердая фаза представлена бесцветным кристалликом кубической формы. Гомогенизация всех включений осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 480—420° С (двухфазовые) и 410—180° С (трехфазовые). Поскольку мы не располагаем в данном случае критериями для выделения первичных включений, нижний температурный предел образования содалита может быть принят несколько выше 480° С.

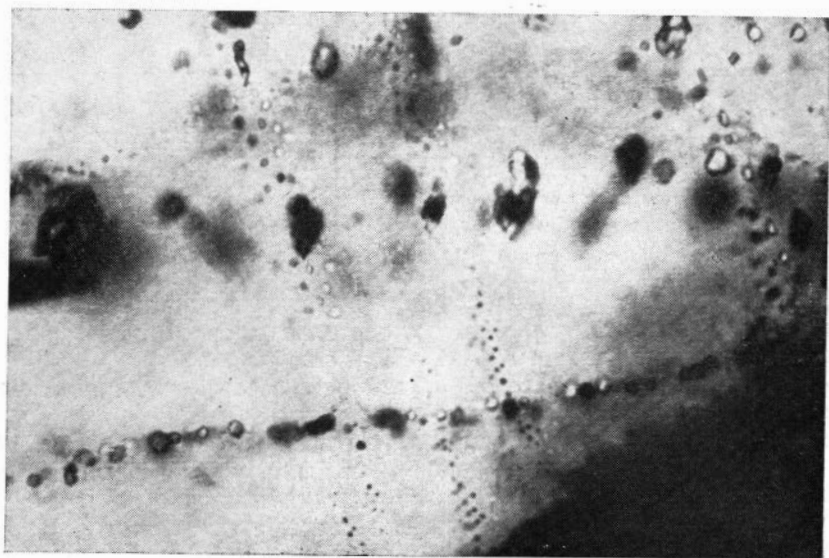


Рис. 29. Включения в содалите. Увел. 800

Включения в минералах сиенитовых пегматитов. Изучались включения в эгирине, щелочной роговой обманке и кальците из участков жилы № 35 горы Долгой.

Включения в эгирине. Были изучены крупные призматические (до 10 см в длину) кристаллы эгирина. Поиски включений, их диагностика и осуществление гомогенизаций значительно затрудняла густо-зеленая окраска пироксена.

В эгирине удалось выделить две генетические группы двухфазовых включений: первичные и вторичные.

Первичные двухфазовые включения имеют форму хорошо ограниченных негативных кристаллов, ориентированных вдоль удлинения кристаллов эгирина (рис. 30). Размеры включений не превышают 0,003 мм в длину. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются от 68 : 32 до 75 : 25. Гомогенизация осуществляется в газовую фазу в интервале температур 550—500°С.



Рис. 30. Первичное жидко-газовое включение в эгирине. Увел. 1000

Вторичные двухфазовые включения обычно приурочены к залеченным трещинам. Они имеют неправильную форму, часто с заливообразными очертаниями. Среди вторичных включений нередки плоские. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются от 20 : 80 до 30 : 70. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу в температурном интервале 400—160°С.

Включения в щелочной роговой обманке. Первичные двухфазовые включения имеют форму длиннопризматических негативных кристаллов, ориентированных параллельно удлинению кристалла-хозяина. Размеры включений достигают в длину 0,01 мм. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются от 30 : 70 до 50 : 50. Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 400—360°С.

Вторичные двухфазовые включения (рис. 31) имеют правильную или частично ограниченную форму, они часто приурочены либо к секущим трещинам, либо к трещинам спайности. Гомогенизация вторичных включений осуществляется в жидкую фазу в температурном интервале 320—180°С.

Включения в кальците. В изучавшемся кальците, представленном мелкими вкрапленниками в щелочной роговой обманке, были встречены две генетические группы включений, отличающиеся по фазовым соотношениям и составу.

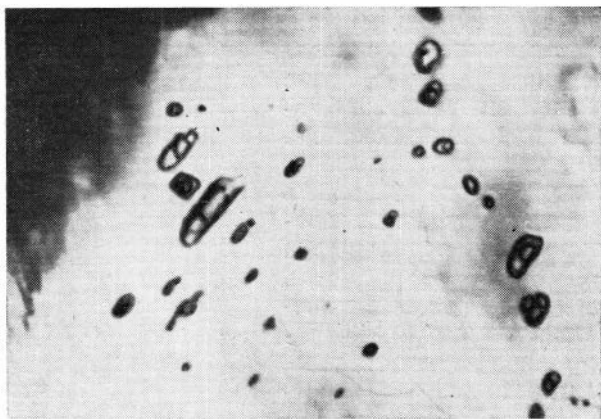


Рис. 31. Группа вторичных включений в щелочной роговой обманке. Увел. 800

Первичные газожидкие включения довольно равномерно рассеяны во вкрапленниках кальцита. Размеры включений составляют 0,01—0,02 мм. Они имеют частично ограниченную или неправильную форму (рис. 32). Фазовые соотношения газ : жидкость составляют интервал 30 : 70 до 45 : 55.

Гомогенизация осуществляется в жидкую фазу в интервале температур 420—380° С.

Вторичные включения представлены главным образом трехфазовыми включениями, в которых третьей фазой является углекислота (рис. 33). Гомогенизация включений осуществляется в жидкую фазу в температурном интервале 290—200° С.

Включения в пирохлоре. Были изучены кристаллы акцессорного пирохлора из альбитового прожилка (мощностью 1—2 см) в миаските. В кристаллах пирохлора были обнаружены хорошо ограниченные октаэдрические негативные формы газожидких включений (рис. 34). Включения имеют размеры до 0,01 мм в поперечнике. Фазовые соотношения газ : жидкость 15 : 90—20 : 85. Включения не приурочены к трещинам. Гомогенизация изученных включений происходит в жидкую фазу при температурах 330—300° С. Таким образом, за нижний температурный предел кристаллизации пирохлора, очевидно, можно принять температуру 330° С.

Температурная характеристика основных типов включений приведена в табл. 8.

Рис. 32. Первичные включения
в кальците. Увел. 600



Рис. 33. Вторичные трехфазовые
включения (с углекислотой) в кальците. Увел. 600

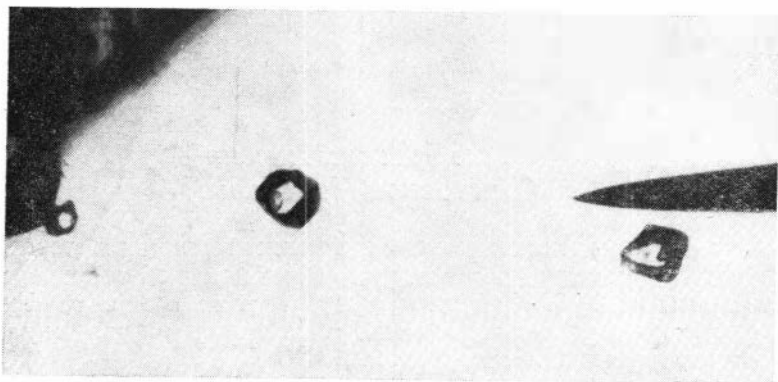
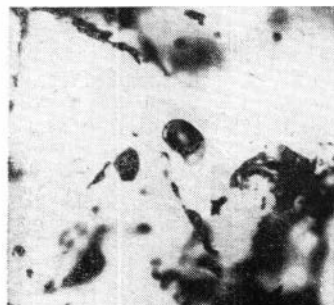


Рис. 34. Первичные газожидкие включения в пирохлоре. Увел. 800

Порода	Изучавшийся минерал	Тип включений	Интервал температур гомогенизаций, °С	Агрегатное состояние
<i>Уральский миаскитовый массив</i>				
<i>Ильменские горы</i>				
Миаскит	Нефелин	Первичн.	—	Расплав
	»	»	950—800	Жидкость
	»	Вторичн.	410—180	»
	»	»	85—40	Газ — жидкость
Миаскитовый пегматит (копь 135)	»	»	500—400	Газ
	»	Первичн.	800—700	Жидкость
	»	Вторичн.	410—165	»
<i>Вишневые горы</i>				
Миаскитовые пегматиты Курочкина лога	Нефелин	Вторичн.	35—40	Жидкость
	»	Вторичн. ?	400—380	»
	Канкринит	»	380—120	»
Прожилок в существенно нефелиновой среднезернистой породе (жила № 35)	Содалит	Первичн. ?	480—420	»
	»	Вторичн.	410—180	»
	Пироксен	Первичн.	550—500	Газ
Сиенитовый пегматит	»			
	Щелочная роговая обманка	Вторичн.	400—160	Жидкость
	То же	Первичн.	400—360	»
		Вторичн.	320—180	»
	Кальцит	Первичн. ?	420—380	»
Альбитовый прожилок в искинте	»	Вторичн.	290—200	»
	Пирохлор	Первичн. ?	330—300	»

Октябрьский массив (Восточное Приазовье)

Из пяти разновидностей нефелинсодержащих пород Октябрьского массива, образцы которых были любезно предоставлены автору В. Г. Кушевым, лишь нефелин типичного фойяита и нефелинового сиенита оказались пригодными для минералотермометрических исследований.

В нефелине фойяита встречено большое количество включений. Они представлены твердыми кристаллическими и газожидкими включениями.

а) Твердые кристаллические включения представлены мельчайшими тонкими призматическими кристалликами зеленого пи-

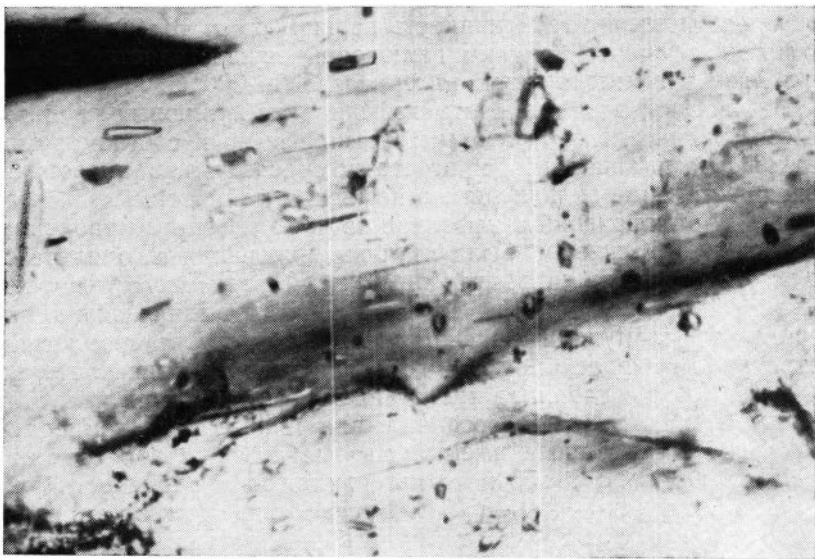


Рис. 35. Высокотемпературные включения в нефелине ($t_{\text{гом}}^{\circ} = 680^{\circ}\text{C}$).
Фойяит. Увел. 1200

роксена (эгирина), ориентированными параллельно оси L_6 нефелина. Размеры включений не превышают 0,01 мм в длину.

б) Двухфазовые наиболее высокотемпературные включения расположены среди твердых кристаллических и ориентированы аналогично последним. Они имеют форму хорошо ограниченных негативных кристалликов (рис. 35). Размеры включений не превышают 0,002 мм в длину. Фазовые соотношения газ : жидкость изменяются незначительно от 65 : 35 до 70 : 30. Гомогенизация включений осуществляется в газовую фазу в интервале температур 700—680°С. Явлений перераспределения материала внутри включений в процессе гомогенизации не наблюдалось, поэтому мы их не выделяем как явно первичные.

Вторичные двухфазовые включения составляют около 80% общего количества двухфазовых включений. Включения имеют форму негативных кристаллов. Среди них можно выделить несколько систем включений, различающихся по фазовым соотношениям, агрегатному состоянию и температурам гомогенизации:

а) двухфазовые газово-жидкие включения, имеющие фазовые соотношения газ : жидкость от 55 : 45 до 60 : 40, гомогенизация которых осуществляется в жидкую фазу при температурах 620—600°С;

б) двухфазовые жидко-газовые включения с фазовыми соотношениями газ : жидкость 70 : 30—80 : 20, гомогенизирующиеся в газ в интервале температур 570—500°С.

в) В двухфазовых газовой-жидких включениях некоторые фазовые соотношения газ : жидкость варьируют от 10 : 90 до 45 : 55. Гомогенизация этой группы включений осуществляется в жидкую фазу в температурном интервале 500—200°С.

Включения, встреченные в нефелине нефелиновых сиенитов, по своей морфологии, фазовым соотношениям и составу, температурам гомогенизации и агрегатному состоянию аналогичны списанным выше включениям в нефелине фойяитов.

Помимо включений в нефелине из образцов, предоставленных автору В. Г. Кушевым, были изучены включения в содалите содалитового прожилка в нефелине мариуполитового пегматита (музейная коллекция ИГиГ СО АН СССР) и в пироксене мелкозернистого мариуполита из коллекций кафедры минералогии и петрографии Новосибирского государственного университета.

Включения в содалите представлены двумя системами, отличающимися по фазовым соотношениям и интервалу температур гомогенизации. Первые имеют фазовые соотношения газ : жидкость от 35 : 65 до 50 : 50 и гомогенизируются в жидкость в интервале температур 450—390°С. Вторые имеют фазовые соотношения газ : жидкость от 15 : 85 до 25 : 75 и гомогенизируются также в жидкость при температурах 240—150°С. У этой группы включений отмечается приуроченность к залеченным трещинам.

В пироксене из мариуполита кроме средне- и низкотемпературных включений были встречены двухфазовые включения, гомогенизация которых осуществляется в жидкость в температурном интервале 720—700°С.

Характеристика температур гомогенизации основных типов изучавшихся включений приведена в табл. 9.

Таблица 9

Порода	Изучавшийся минерал	Тип включений	Интервал температур гомогенизации, °С	Агрегатное состояние
Фойяит	Нефелин	Первичн. ?	700—680	Газ
	»	Вторичн.	620—600	Жидкость
	»	»	570—500	Газ
	»	»	500—200	Жидкость
Нефелиновый сиенит	»	Первичн. ?	700—680	Газ
	»	Вторичн.	640—600	Жидкость
	»	»	550—500	Газ
	»	»	450—160	Жидкость
Содалитовый прожилок в нефелине мариуполитового пегматита	Содалит	Первичн. ?	450—390	Жидкость
	»	Вторичн.	240—150	»
Мариуполит	Пироксен	Первичн. (?)	720—700	»

ДАВЛЕНИЕ ЛЕТУЧИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МАССИВОВ ИЗУЧАВШИХСЯ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД

Генетические вопросы формирования интрузий не могут быть решены без выяснения конкретных физико-химических условий кристаллизации материнской магмы. Наряду с температурой и составом наиболее важным фактором, имеющим существенное значение в процессах кристаллизации магмы, является давление летучих, содержащихся в расплаве.

В экспериментально изученных силикатных системах с летучими влияние давления летучих проявляется в снижении температуры эвтектической кристаллизации, изменении областей устойчивости минералов, изменении составов эвтектики и т. д.

При определении давления, существовавшего в процессе формирования изучавшихся щелочных пород, нами использовались первичные газово-жидкие включения. По нашему мнению, эти включения представляют собой реликты — пузырьки летучих, выделяющиеся из расплава при снижении температуры и давления в процессе кристаллизации магмы.

Многими петрологами (Р. В. Горансон, А. Н. Заварицкий, К. А. Власов, О. Таттл и др.) признается существование ограниченной растворимости летучих в расплавах (в магме). В некоторых работах приводятся различные модели процесса отделения летучих (Власов, 1955; Николаев, 1945 и др.). Основные положения вопроса отделения летучих в работах, приведенных выше, сводятся к следующему. При снижении температуры расплава в некоторый момент достигается концентрация насыщения магмы летучими. Дальнейшее снижение температуры и, как следствие, снижение давления летучих, уменьшая растворимость, вызывает отделение избыточной против концентрации насыщения части летучих. Выделившиеся таким образом избыточные части летучих подвергаются гравитационной дифференциации и накапливаются в верхних частях кристаллизующейся магмы (Власов, 1955).

Применяя этот механизм отделения летучих в нашем случае, как уже указывалось ранее, мы полагаем, что выделившиеся мельчайшие пузырьки летучих в зависимости от своих размеров (подъемная сила) и вязкости магмы будут в различной степени подвергаться гравитационной дифференциации. При весьма малых размерах пузырьков и высокой вязкости магмы явления гравитации могут быть выражены чрезвычайно слабо. Выделившиеся мельчайшие пузырьки летучих захватываются в процессе кристаллизации минералов нефелиновых сиенитов. Захват пузырьков в магме облегчается высокой степенью вязкости расплавов и ухудшением условий для диффузии в области соприкосновения пузырька с растущим кристаллом. Захваченные в процессе кристаллизации расплава пузырьки (реликты) выде-

лившихся, избыточных (против растворимости в магме при данных условиях) летучих и представляют собой первичные газожидкие включения, несущие информацию условий захвата (кристаллизации пород). Необходимо отметить, что первичные включения (реликты выделившихся летучих) в момент захвата находились под давлением, равным давлению, существовавшему в магме в процессе кристаллизации и зависящему от нагрузки вышележащего материала (литостатическое давление). Поэтому полученные нами давления летучих во включениях в момент гомогенизации характеризуют собой минимальное литостатическое давление. Очевидно, что верхний предел давления (максимум) по газожидким включениям в настоящее время не может быть получен, и имеющиеся значения носят гипотетический характер. Нижний же предел (минимальный) давления, полученный по газожидким включениям, представляется достаточно достоверным.

Плотность и состав растворов высокотемпературных первичных газожидких включений зависят от существовавших в процессе кристаллизации температуры, давления и состава летучих и в общем случае характеризуют эти условия.

Определение давления в первичных газожидких включениях в минералах изучавшихся щелочных пород проводилось приемами, разработанными Ю. А. Долговым, Л. Ш. Базаровым и И. Г. Бакуменко (1965). Сущность использованных приемов заключается в последовательном проведении ряда операций.

1. Выбор первичного включения.
2. Определение температуры его гомогенизации.
3. Определение концентрации солей в растворе во включении на установке для замораживания включений (Базаров, 1966). В случаях, когда концентрация растворов во включениях достигает состояния насыщения, величина концентрации известных солей (NaCl) может быть определена по температуре гомогенизации твердой фазы.
4. Определение состава газовой фазы выбранного включения методом газового анализа индивидуальных включений (Долгов и Шугурова, 1956).
5. Определение по диаграммам для соответствующих систем (Стырикович, Хайбуллин, 1956; Вукалович, 1958; Sourirajan а. Kennedy, 1962; Takenouchi а. Kennedy, 1964; Хитаров и Малинин, 1958 и др.) давления при температуре гомогенизации.

Определение давления во включениях в нефелине представляет собой чрезвычайно кропотливую, требующую большого терпения работу. Трудности обуславливаются малым размером включений, тонкостью и хрупкостью пластинок, большим числом различных операций. Потеря включения на любом из последовательных этапов сводит к нулю все затраченные ранее усилия. В среднем лишь в одном из выбранных десяти включений удается довести все определения до конца. Затраты време-

ни на одно законченное определение составляют в среднем 5—8 дней.

Нами было определено давление во включениях в нефелине: нефелиновых сиенитов Ботогольского массива — 5 определений, в нефелине щелочных пород Нюрганского массива — 3, в нефелине уртитов и фойяитов Ловозерского массива — 8, в нефелине щелочных пород Октябрьского массива — 3, в нефелине миаскиитов и пегматитов Урала — 3. Всего проведено 22 определения, из них в первичных включениях 16, во вторичных 6.

Определение давления во вторичных включениях представляет интерес для оценки величины изменения давления в системе межзерновых и трещинных пространств, заполненных растворами в посткристаллизационный период, при значительном снижении температуры (200—500° ниже температуры кристаллизации).

Все полученные результаты по замерам давления для нефелинов приведены в табл. 10.

Приведенные в табл. 10 результаты определения давления летучих в момент гомогенизации в первичных газовой-жидких включениях представляют возможность оценить ориентировочную глубину формирования массивов.

Максимальное давление, полученное во включениях в нефелине Ботогольского массива, составляет 1470 атм. Если принять средний удельный вес пород равным 2,5 г/см³, то давлению 1470 атм будет соответствовать глубина, равная $1470 : 250 = 5,9$ км. Учитывая некоторое сопротивление кровли литостатическому давлению (Тернер и Ферхуген, 1961), эта глубина может оказаться несколько большей. Отметим здесь, что полученные величины давления характеризуют собой лишь минимальный предел давления (не менее) для начальных этапов кристаллизации магмы.

Глубина формирования Нюрганского массива аналогична глубине кристаллизации Ботогольского и составляет около 6 км.

Давления, полученные во включениях в нефелине Ловозерского и Октябрьского массивов, позволяют оценить глубину формирования массивов соответственно более чем 6 и около 5 км.

Существенный интерес представляет сопоставление полученного нами давления летучих (глубины) с глубиной формирования массивов, определенной иными приемами (Костюк, Базарова, 1966). Последнее представилось возможным провести лишь для Ботогольского и Нюрганского щелочных массивов.

По данным В. П. Арсентьева (1960), в строении района развития Ботогольского и Нюрганского щелочных массивов принимает участие слюдянская серия архея, сложенная гнейсами и карбонатными породами; мощность серии составляет 3000—4000 м. Нижняя часть разреза представлена иркутской свитой (протерозой) мощностью около 2000 м. Выше расположена

Краткая характеристика минерала	Тип включений	Характеристика включений в момент гомогенизации						
		температура, °С	агрегатное состояние	концентрация солей, вес. %	удельный объем* CO ₂	давление раствора, атм	давление растворенной CO ₂ , атм	Полное давление, атм
<i>Ботогольский массив</i>								
Нефелины из нефелиновых сиенитов	Первичн.	760	Жидкость	22,8	145	1455	15	1470
	»	700	»	25,6	170	1255	15	1270
Нефелин из пегматоидных разновидностей нефелиновых сиенитов	»	720	Жидкость	26,1	210	1340	10	1350
	»	710	»	26,2	125	1285	20	1300
	Вторичн.	400	»	7,8	10	275	10	280
<i>Нюрганский массив</i>								
Нефелин из нефелиновых сиенитов	Первичн.	740	Жидкость	46,3	20	1330	10	1340
	»	730	»	43,1	150	1300	10	1310
	Вторичн.	500	»	41,7	100	400	20	430
<i>Ловозерский массив</i>								
Нефелин из уррита	Первичн.	810	Жидкость	22,0	120	более 1500	30	более 1530
	Вторичн.	710	»	26,5	115	1280	20	1300
	»	400	»	10,3	Не опр.	580	—	580
Нефелин из уррита	Вторичн.	710	Жидкость	24,7	150	1280	10	1290
	»	700	»	26,6	100	1260	20	1280
	»	300	»	31,3	250	55	5	60
Нефелин из фойяита	Первичн.	720	»	19,8	150	1330	20	1350
	Вторичн.	450	»	37,2	80	310	25	335

Октябрьский массив

Нефелин из фойянта	Первичн.	700	Газ	23	130	1160	15	1115
	»	680	»	25,5	150	1240	20	1260
	Вторичн.	620	Жидкость	18,3	170	990	10	1000

Уральский миаскитовый массив

Нефелин из миаскитов. Ильменские горы	Первичн.	800	Жидкость	45	Не опр.	Более 1400	—	Более 1400
	Вторичн.	710	»	44	»	1200	—	1200
Нефелин из пегматита. Ильменские горы	»	410	»	21	»	280	—	280

* Из газов, присутствующих во включениях, наибольшее значение имеет углекислота (CO₂). Влияние прочих газов на величину давления вследствие их больших удельных объемов не существенно.

уртагольская свита мощностью 1000—2000 м, лежащая под карбонатной монгошинской свитой, имеющей 1500—2000 м, которая подстилает последнюю сланцево-песчаную толщу окинской свиты (3000—3500 м). Схема, предложенная Н. Л. Додины (1961), отличается лишь наименованием и расположением свит. Общая мощность отложений докембрия в этой части Восточного Саяна оценивается им примерно той же величиной (12—15 тыс. м). По Н. Л. Додину, разрез завершает не окинская, а монгошинская свита.

Поскольку Ботогольский и Нюрганский массивы приурочены к горизонту монгошинской свиты, средняя глубина формирования по реставрированному разрезу (аналогия с соседними участками) составляет 5—6 тыс. м.

Образование волластонита в известняках на экзоконтактах интрузий позволило В. С. Соболеву (1947) с помощью «геологического манометра» Д. С. Коржинского определить глубину формирования описываемых здесь пород. В условиях метаморфизма образование и устойчивость волластонита в карбонатных породах определяется в первую очередь режимом углекислоты.

Появление волластонита вместе с гроссуляром и диопсидом позволяет отнести эти породы к третьей или четвертой фации глубинности, по Д. С. Коржинскому (1940). Парциальное давление углекислоты, примерно соответствующее давлению статической нагрузки и определяющее устойчивое существование волластонитовой фации, должно быть достаточно высоким — значительно выше 350 атм (Ревердатто, 1962), выше 1200 атм (предел устойчиво-

сти периклаза), но гораздо ниже 5000 атм (Заварицкий, Соболев, 1961). Это обосновывается тем, что в нашем случае совершенно отсутствуют первые три фации Д. С. Коржинского. Отсутствие периклаза не позволяет (Соболев, 1947) строго отнести описываемый комплекс к III или IV фациям глубинности, но во всяком случае он должен находиться левее границы, разделяющей IV и V фации. Экспериментами, проведенными Н. И. Хитаровым, Е. Б. Лебедевым и др. (1962), установлено, что волластонит в известняках может образоваться при давлениях 500—1000 атм в случае, когда температура была несколько ниже 1000° С; при давлениях около 2000 атм в случаях, когда температура не достигает 900°.

По современным представлениям, температуры, при которых осуществляются метаморфические процессы на значительных глубинах, не превышают 850° (Соболев, 1955), следовательно, давления в нашем случае были выше 1000 атм и менее 2000 атм.

Сопоставление данных о глубине формирования Ботогольского и Нюрганского щелочных массивов, полученных тремя различными способами, обнаруживает хорошую сходимость результатов и, на наш взгляд, позволяет однозначно определить минимальную глубину формирования массивов в 5,8—6,5 тыс. м.

Давления, полученные во вторичных включениях, позволяют оценить пределы давлений, при которых осуществлялось залечивание вторичных трещин в нефелине (и других минералах) в постмагматическую гидротермальную стадию (табл. 10).

СОСТАВ РАСТВОРОВ ВО ВКЛЮЧЕНИЯХ В МИНЕРАЛАХ ИЗУЧАВШИХСЯ ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД

Летучие компоненты (H_2O , CO_2 и др.) играют существенную роль в процессах кристаллизации магмы. Имея, как правило, незначительные весовые содержания (в составе магмы) и низкие молекулярные веса, летучие обладают существенными молярными долями в расплавах. При содержании воды в альбитовом расплаве, равном 6 вес. %, молярная доля составляет около 50% (Тернер и Ферхуген, 1961). Этим и объясняется существенное влияние малых весовых содержаний воды на изменение химических потенциалов компонентов в расплаве. Летучие существенно понижают вязкость расплавов, изменяют области устойчивости минералов, составы эвтектик и т. д.

При изучении состава растворов во включениях нами использовался получивший широкое распространение (Грушкин, 1952; Roedder, 1958; Калюжный, 1961; Хитаров, 1965 и др.) метод водных вытяжек содержимого включений.

Как известно, результаты химического анализа водных вытяжек представляют собой суммарный, валовый состав раство-

ров, охватывающий всю историю существования исследуемого материала в соответствии с характером и типом находящихся в нем включений. В минералах наряду с первичными включениями, составляющими, как правило, меньшую часть общего количества включений, обычно присутствуют вторичные включения, характеризующие посткристаллизационную историю минерала.

Материалом для приготовления водных вытяжек послужили: нефелин, пироксен, кальцит двух генетических типов и гранат из пород Ботогольского щелочного массива; нефелин из нефелиновых сиенитов Нюрганского и уртитов Ловозерского щелочных массивов и нефелин из пегматитов Ильменских и Вишневых гор.

Имеющиеся в литературе результаты определений составов водных вытяжек выражены, как правило, в граммах (или миллиграммах) на 100 г образца-навески. Подобное изложение результатов анализа подверглось справедливой критике на II Всесоюзном совещании по геотермобарометрии, проходившем в г. Новосибирске в 1965 г. Отнесение результатов к весу образца никаким образом не характеризует концентрацию солей в растворах, поскольку полученные результаты не связаны с количеством растворов, присутствующих во включениях испытуемого образца.

Определение суммарного количества жидкости во включениях для расчетов концентрации солей в минералообразующих растворах может быть проведено двумя путями: по потере в весе при прокаливании и по потере в весе при растворении навески исследуемого минерала в кислотах с последующим выпариванием.

Проведенные проверки показали, что при выпаривании растворенной навески происходят большие потери веса, по-видимому, за счет образования газообразных соединений с кислотой (SiF_4). Пстери же в весе при прокаливании исследуемого минерала оказались недопустимо малы, что, вероятно, можно объяснить способностью включений допускать существенный перегрев без взрывов, тем более, что температуры гомогенизации большого числа включений превышают 700°C . Определенное химическим анализом содержание элементов в растворах, выраженное в мг на 1 мл, было пересчитано нами на среднюю концентрацию солей в растворах, полученную методом замораживания включений. Данный прием несомненно имеет свои недостатки, но они, на наш взгляд, менее значительны, чем недостатки метода определения количества растворов по потере веса при прокаливании или метода растворения пробы в кислотах.

Полученные нами результаты определения состава растворов водных вытяжек, приведенные в табл. 11, следует рассматривать как частичный анализ состава растворов. Несоответствие

Минерал, номер и место взятия пробы	Катионы, вес. %									Анионы, вес. %				Кон- центра- ция, вес. %	pH
	K	$\frac{Na}{K}$	Na	Si	Al	Ca	Fe	Ti	Mg	Cl ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		
Нефелин, № 87, Ботогольский мас- сив	0,339	16	5,591	He обн.	0,292	1,123	0,377	0,037	Сл.	4,534	1,171	1,450	2,275	17,2	7,5
Нефелин, № 284, Нюрганский массив	0,766	14	10,157	13,26	He обн.	He обн.	0,171	He обн.	0,285	6,396	He обн.	1,470	3,313	24,3	7,2
Нефелин, № 5273, Ловозерский массив	0,405	22	8,757	He обн.	0,865	0,554	0,229	0,07	Сл.	3,400	2,248	0,459	1,042	18,6	6
Нефелин, Ильмен- ские горы, копь № 135	0,724	18	12,966	0,230	0,836	1,381	0,177	0,170	He обн.	6,270	He обн.	4,370	4,069	26,8	6,9
Нефелин, Вишне- вые горы, Куроч- кин лог	0,546	9	5,019	0,699	0,123	0,021	0,131	0,057	» »	3,108	» »	1,881	0,624	12,2	8
Кальцит, № 24/6, Ботогольский мас- сив	0,256	16	4,028	3,661	He обн.	0,501	0,185	0,377	» »	4,468	» »	3,451	He опр.	16,9	6,6
Кальцит, № 54/1, Ботогольский мас- сив	0,112	7	0,812	1,624	0,758	1,842	1,300	0,057	» »	1,245	» »	He обн.	» »	7,7	6,3
Пироксен, № 24/6, Ботогольский мас- сив	0,308	16	4,726	5,193	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	» »	2,560	» »	1,521	0,967	15,2	6,1
Гранат, № 8, Бо- тогольский массив	0,549	16	8,340	0,584	0,115	0,134	0,260	0,080	» »	1,536	1,883	0,693	0,405	14,5	6,6

эквивалентных количеств катионной и анионной частей свидетельствует, по-видимому, о том, что в растворах присутствуют неоткрытые анионы (возможно, анионы и катионы). Провести полный анализ растворов на все предполагаемые элементы не представляется возможным вследствие ограниченности объема растворов — водных вытяжек и отсутствия разработанных методов микрохимии.

Наряду с определением состава жидкой фазы во включениях был определен полный и частичный состав газовой фазы включений в нефелине всех изучавшихся пород. Все полученные результаты приведены в табл. 12.

Поскольку в настоящее время мы не имеем критериев для суждений о солевом составе (типа соли) растворов высокотемпературных включений, а, как известно (Беус, Соболев, 1962), при высоких температурах вполне возможно образование комплексных соединений некоторых металлов (например, со фтором), состав растворов во включениях приводится нами в форме отдельных элементов (Na, K, Fe и т. д.).

В составе растворов во включениях в нефелине нефелиновых сиенитов Ботогольского массива (табл. 11) обнаружены следующие элементы (в порядке уменьшения содержания): катионы — Na, Ca, Fe, K, Al, Ti, Mg (следы); анионы — Cl, HCO_3 , SO_4 , F. Причем, Na, Cl составляют около 70% веса всех остальных элементов.

В составе растворов во включениях в нефелине Нюрганского щелочного массива качественный и количественный состав элементов несколько иной. Здесь так же, как и в Ботогольском массиве, главное значение принадлежит Na, составляющему до 10,157 вес. %. Второе место занимает Si, затем K, составляющий 0,766 вес. %, далее следуют Mg, Fe. Титан не обнаружен.

В составе анионов на первом месте Cl, составляющий до 6,396 вес. %, далее HCO_3 — 3,316 вес. %, затем SO_4 — 1,470 вес. %; фтор не определялся.

Состав растворов во включениях в нефелине Ловозерского массива (уртитов) в общих чертах аналогичен составу растворов во включениях в нефелине Ботогольского массива. В порядке уменьшения содержания элементы составляют следующий ряд: катионы — Na, Al, Ca, K, Fe, Ti, Mg (следы); анионы — Cl, F, HCO_3 , SO_4 .

Состав водных вытяжек из нефелина Ильменских гор качественно представлен следующими катионами (в порядке уменьшения содержания): Na, Ca, Al, K, Si, Ti, Fe, Cl, SO_4 , HCO_3 ; фтор отсутствует.

Состав растворов во включениях в нефелине Вишневых гор аналогичен составу водных вытяжек из нефелина Ловозерского массива. Качественное отличие заключается в присутствии кремния, составляющего до 0,699 вес. %. В порядке уменьше-

Таблица 12

Характеристика анализируемых включений	Состав газа, объемн. %		
	CO ₂	Углеводороды	N+редкие газы
<i>Ботогольский щелочной массив</i>			
Нефелиновый сиенит	97,0	Не опр.	3,0
Первичные газОВО-жидкие включения	96,5	» »	3,5
	82	» »	18,0
	93,7	» »	6,3
Вторичные газОВО-жидкие включения	91,3	Не опр.	8,7
<i>Ловозерский щелочной массив</i>			
Уртит			
Первичные газОВО-жидкие включения	73,2	Не опр.	26,8
	73,7	» »	26,3
	64,7*	» »	35,3
	83,4	» »	12,6
Уртит			
Вторичные газОВО-жидкие включения	74,3	Не опр.	25,7
	53,8	» »	45,8
	80,5	» »	13,5
	78,7	» »	21,3
Вторичные газовые включения	21,7**	78,3	0,0
	28,6**	71,5	0,0
Фойяит			
Первичные? газОВО-жидкие включения	87,3	Не опр.	21,7
Вторичные	9,27**	90,73	0,0
<i>Октябрьский массив</i>			
Фойяит			
Первичные? газОВО-жидкие включения	99,2	Не опр.	0,8
	78,3	» »	21,7
Вторичные газОВО-жидкие включения	96,5	»	3,5
<i>Уральский миаскитовый массив</i>			
Пегматит			
Вторичные существенно углекислотные включения	99,4	Не опр.	0,6
	98,5	» »	1,5

* Не обнаружены —SO₂, H₂S, NH₃, Cl.

** Проведен полный химический анализ газовой фазы включений, обнаружены углекислота и углеводороды.

ния содержания присутствуют: катионы — Na, Si, K, Fe, Al, Ti, Ca; анионы — Cl, SO₄, HCO₃; фтора не обнаружено.

Составы водных вытяжек, полученных из включений в кальците двух генетических типов (Ботогольский массив), существенно отличаются один от другого. Это отличие резко всего проявляется в отношении Na к K, составляющего у высокотемпературного кальцита (24/6) примерно 16, а у низкотемпературного

кальцита (54/1) 7, и в значительно меньшей концентрации солей во включениях низкотемпературного кальцита.

В составе водных вытяжек из включений в пироксене обнаружены только SiO , Na , K , Cl , SO_4 , HCO_3 .

Состав водных вытяжек из граната приконтактных участков нефелиновых сиенитов Ботогольского массива в катионной части качественно почти аналогичен составу вытяжек из кальцита (24/6). Анионная часть отличается присутствием фтора.

Отношение натрия к калию в водных вытяжках из высокотемпературных минералов и граната из гранатосодержащих нефелиновых сиенитов Ботогольского массива составляет приблизительно 16. Этим в какой-то мере подчеркивается общность условий образования и дальнейшей истории изучавшихся минералов.

Преобладание натрия над калием (в различных соотношениях) отмечается для водных вытяжек всех исследованных минералов. Для нюрганских нефелинов это отношение составляет 15, ловозерских 22, ильменских 18, вишневогорских 9.

Анализ газовой фазы проводился Н. А. Шугуровой.

Как уже было указано выше, метод основан на селективном поглощении различных газов (H_2S , SO_2 , Cl , CO_2 , O_2 , H_2 , NO и др.) специально подобранными для этой цели поглотителями.

Анализировались первичные и вторичные включения в нефелине всех изучавшихся щелочных пород. В газовой фазе включений в нефелине ботогольских нефелиновых пород главной составной частью (до 97,0 объемн. %) является углекислота. Остаток газов, составляющий 3% объема газового пузыря, далее не мог быть анализирован вследствие чрезвычайно малых размеров (диаметр менее 0,0002 мм). Очевидно, в составе этих 3% некоторая доля принадлежит каким-то прочим газам, имеющим весьма малую концентрацию. Газовая фаза первичных включений в нефелине октябрьских нефелиновых сиенитов состоит на 99,2 (объемн. %) из углекислоты (CO_2). Неопределенный остаток составляет 0,8% объема газовой фазы.

В газовой фазе вторичных включений в нефелине Вишневых гор (Урал) CO_2 составляет до 99,4 объемн. %. Анализировать далее чрезвычайно малый остаток не представляется возможным. Минимальное значение содержания углекислоты во включениях в нефелине Вишневых гор составляет 98,5%. Во включениях в нефелине уртитов Ловозерского массива (температура гомогенизации включения составляет 860°C) в составе газовой фазы обнаружено 73,2 объемн. % углекислоты (CO_2). В составе газовой фазы включения, имеющего температуру гомогенизации 920°C , углекислота составила 73,7%. В более низкотемпературных включениях (вторичных) концентрация углекислоты зако-

номерно снижается до 9,27 объемн. %. Причем прочая часть газов представлена углеводородами (до 90,73%) (табл. 12).

В составе газовой фазы анализированных включений практически отсутствуют следующие газы: H_2S , SO_2 , NH_3 , Cl , NO , CO , O_2 , H_2 .

Необходимо отметить, что проведение анализа газового состава индивидуальных включений в нефелине встретило серьезные трудности, обусловленные ограничениями разрешающих способностей микроскопов, на которых выполнялись анализы. Для проведения газового анализа нам пришлось заниматься чрезвычайно кропотливой работой по поиску достаточно крупных первичных включений.

Резюмируя приведенные выше результаты, представляется необходимым отметить следующее.

В составе летучих, участвовавших в процессе магматической кристаллизации пород изучавшихся массивов, главная роль принадлежала воде (H_2O) и углекислоте (CO_2). В составе летучих принимали участие также Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , образовавшиеся с определенными катионами (Na , K , Ca и т. д.) растворенные в воде и расплаве соли.

Содержание летучих достигало концентрации насыщения при температуре кристаллизации, и избыточные количества летучих, содержащиеся в расплаве при снижении температуры, выделялись в виде самостоятельной фазы. Последнее обстоятельство обуславливается ограниченной растворимостью летучих в расплаве, зависящей от давления летучих при данной температуре.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ИЗУЧАВШИХСЯ ПОРОД

Генетические вопросы формирования щелочных пород рассматриваются многими авторами в огромном количестве работ: А. Н. Заварицкий, Д. С. Белянкин, Е. А. Кузнецов, Б. М. Куплетский, Л. Ф. Айнберг, А. Е. Ферсман, Н. А. Елисеев, В. И. Лучицкий, В. С. Соболев, В. С. Соболев и Н. А. Флоренсов, В. П. Солоненко, К. А. Власов, Н. А. Елисеев, В. П. Костюк, Т. Ю. Базарова, Л. С. Бородин, Е. А. Бутакова и другие.

Критерии, используемые различными исследователями для генетических построений, не позволяют, как правило, в каждом конкретном случае однозначно решить вопрос о происхождении изучаемых пород.

Существующие разногласия в решении генетических вопросов формирования некоторых массивов (Ботогольский, Октябрьский и др.) обусловлены, на наш взгляд, отсутствием достаточ-

ного количества экспериментальных работ, посвященных выяснению условий их формирования.

В данном разделе рассматриваются вопросы температур, давлений и состава летучих при кристаллизации, полученных в результате минералотермометрических исследований.

Существующие в настоящее время представления о генезисе изучавшихся пород, основанные на минералого-петрографических исследованиях, кратко изложены в первом разделе.

Поскольку вопросы образования и механизма внедрения исходного расплава восточносибирских щелочных пород рассмотрены В. П. Костюком в ряде работ (Костюк, 1964; Костюк и Базарова, 1966 и др.), здесь мы не останавливаемся на их освещении.

Ботогольский массив

В нефелиновых сиенитах Ботогольского массива минералотермометрическими методами, как уже было отмечено выше, исследовались: нефелин, клинопироксен, высокотемпературный кальцит, канкринит, волластонит, гранат и низкотемпературный кальцит.

Наиболее высокие температуры гомогенизации первичных газово-жидких включений в нефелине составляют 850°C (без поправки на давление)¹. Давление летучих, определенное в момент гомогенизации (760°C) первичного включения в нефелине, составляет 1470 атм . Очевидно, что при температуре 850° давление было существенно выше. Полученные значения (850° и 1470 атм) характеризуют собой возможный нижний предел температуры и давления, существовавший в начале процесса кристаллизации.

Имеющиеся в литературе результаты экспериментального изучения систем (Маккензи, 1954) показывают, что в системе альбит — нефелин — вода температура кристаллизации в эвтектической точке составляет 670°C при давлении воды в 1000 атм . В системе альбит — нефелин — вода прибавление калиевого полевого шпата также должно несколько снизить температуру эвтектики. В настоящее время установлено (Goranson, 1931, 1932; Mac-Kenzie, 1954 и др.), что увеличение давления летучих в расплаве вызывает понижение температуры эвтектической кристаллизации. Причем для системы альбит — нефелин увеличение давления воды от нуля до 1000 атм вызывает изменение температуры кристаллизации от 1068 до 870°C .

Представляется совершенно очевидным, что в нашем случае при температуре 850°C и давлении летучих более 1470 атм в

¹ Здесь и далее поправка на давление не учитывается.

многокомпонентной природной системе вполне возможно существование расплава.

На кристаллизацию нефелина из расплава с несомненностью указывает факт наличия раскристаллизованных твердых включений, захват которых возможен лишь при условии магматической кристаллизации. Состав летучих, участвовавших в процессах кристаллизации нефелиновых сиенитов, полученный при проведении химических анализов содержимого включений, представлен водой (H_2O) и углекислотой (CO_2), составляющей до 97% объема газовой фазы включений. По данным анализов водных вытяжек в составе растворов во включениях присутствуют также катионы: Na, Ca, Fe, K, Al, Ti и анионы: Cl, F, SO_4 и HCO_3 . Концентрация солей в растворах наиболее высокотемпературных включений, определенная методами замораживания, составляет около 26 вес. %.

Изучение включений в кальците ботогольских нефелиновых сиенитов позволило выделить две генерации кальцита: высокотемпературную и низкотемпературную.

Высокотемпературный кальцит кристаллизовался из расплава одновременно с нефелином (возможно, и ранее), кали-натровым полевым шпатом и пироксеном, низкотемпературный является продуктом постмагматической, гидротермальной деятельности.

Нижний температурный предел процессов канкринитизации в нефелиновых сиенитах Ботогола по температурам гомогенизации вторичных включений составляет $400^\circ C$.

Для граната из типичных метасоматических пород Ботогола возможный нижний температурный предел кристаллизации составляет также $400^\circ C$ (не ниже). Поскольку для граната из приконтактовых участков нефелиновых сиенитов получены лишь температуры гомогенизации вторичных включений ($400^\circ C$), действительная температура их кристаллизации может быть существенно выше полученной максимальной температуры гомогенизации.

Кристаллизация волластонита из приконтактовых зон нефелиновых сиенитов и известняков осуществлялась при температуре выше $520^\circ C$. Полученное давление во вторичном включении в нефелине (температура гомогенизации $400^\circ C$) характеризует минимальное давление летучих для вторичных процессов (канкринитизация, содалитизация, образование позднего кальцита и др.) и составляет не менее 280 атм.

Нюрганский щелочной массив

В нефелиновых сиенитах Нюрганского массива минералотермометрическими методами изучался нефелин. Наиболее высокие температуры гомогенизации первичных газовой-жидких

включений составляют 850°C . Интервал температур гомогенизации первичных включений $700\text{--}850^{\circ}\text{C}$. Давление летучих в момент гомогенизации включений составляет 1340 атм при температуре 740°C . В составе летучих принимали участие вода

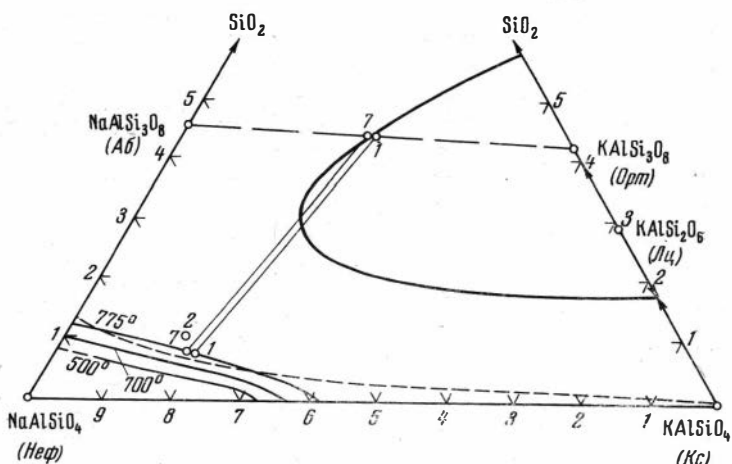


Рис. 36. Система нефелин — кальсилит — кремнезем

Точки составов: 1, 2— Ботогол, 7— Нюрган. Сплошными линиями нанесены изотермы $500, 700, 775^{\circ}$, отражающие температуры кристаллизации нефелина в зависимости от содержания кальсилита и избыточного кремнезема в системе $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{--KAlSi}_3\text{O}_8\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$, экспериментально изученной Гамильтоном и Мак-Кензи (Hamilton, Mak-Kenzie; 1960; Hamilton, 1961)

(H_2O), углекислота (CO_2), в растворах во включениях присутствуют ионы: Na, K, Si, Fe, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3 . Солевая концентрация растворов в первичных включениях достигает $46,3\text{ вес. \%}$.

Кристаллизация нефелиновых сиенитов Нюрганского массива осуществлялась из магматического расплава. Начальные этапы кристаллизации характеризуются температурой выше 850°C и давлением выше 1500 атм (экстраполяция полученного давления до температур 850°C).

Отметим, что для нюрганских нефелиновых сиенитов, как и для ботогольских, полностью отсутствует пневматолитовый этап в постмагматических процессах. Среди изученных включений не было встречено ни одного включения, которое бы гомогенизировалось в газовую фазу.

Интересные результаты были получены автором совместно с В. П. Костюком при сопоставлении данных минералотермометрического изучения с результатами отпределения температур кристаллизации нефелина по признаку избыточности кремнезема в

нем (Hamilton, 1961). Точки составов ботогольских и нюрганских нефелинов ложатся на диаграмме Гамильтона на изотерму 775°C (рис. 36) и выше.

Ловозерский щелочной массив

В породах дифференцированного комплекса Ловозерского щелочного массива изучался нефелин уртитов, фойяитов и люавритов, а также эгирин из фойяитов.

Температуры гомогенизации первичных включений составляют интервал $810\text{—}980^{\circ}\text{C}$. Давление летучих в момент гомогенизации (с некоторой экстрополяцией по диаграмме) существенно превосходит 1500 атм . Состав летучих представлен водой (H_2O), углекислотой (CO_2), в составе растворов присутствуют Na, K, Al, Ca, Fe, Ti, Cl, F, SO_4 , HCO_3 . Во вторичных существенно газовых включениях газовым анализом индивидуальных включений обнаружены углеводороды, составляющие до 90 объемн. %.

Концентрации солей в растворах первичных включений достигают 26,6 вес. %.

Результаты минералотермометрических исследований включений, по нашему мнению, убедительно свидетельствуют о кристаллизации дифференцированного комплекса Ловозерского массива из расплава.

Уральский миаскитовый массив

Температуры гомогенизации первичных включений в нефелине из миаскитов (Ильменские горы) составляют интервал $950\text{—}800^{\circ}\text{C}$. Давление в момент гомогенизации (800°C) более 1400 атм .

Максимальные температуры гомогенизации первичных включений в нефелине миаскитовых пегматитов конечной стадии магматической кристаллизации (Ильменские горы) 800°C , давление в момент гомогенизации (710°C) 1200 атм . Состав газовой фазы не определялся. В составе растворов из включений нефелина пегматитов присутствуют следующие элементы: Na, K, Si, Al, Ca, Fe, Ti, Cl, SO_4 , HCO_3 . Полученные данные (950°C и более 1400 атм) однозначно свидетельствуют о магматическом происхождении миаскитов и пегматитов. Результаты изучения включений в минералах из пегматитов Вишневых гор позволяют оценить температуры постмагматических процессов (температуры образования содалита, канкринита, эгирина и амфибола сиенитовых пегматитов, низкотемпературного кальцита и пирохлора) (см. табл. 8).

Октябрьский массив (Приазовье)

Наиболее высокотемпературные включения в нефелине нефелиновых сиенитов Октябрьского массива гомогенизируются при температуре 700°С. Давление летучих в момент гомогенизации включений составляет более 1260 атм. Полученные величины характеризуют возможный нижний температурный предел кристаллизации из расплава. Состав летучих по результатам анализа газовой фазы представлен водой (H₂O) и углекислотой (CO₂).

Данных по составу растворов в настоящее время мы не имеем. Содержание углекислоты в газовой фазе достигает 99,2 объемн. %.

Температуры гомогенизации высокотемпературных включений в пироксене мелкозернистых мариуполитов несколько выше и достигают 720°С.

Концентрации солей в растворах в наиболее высокотемпературных включениях достигают 25,5 вес. %. Отсутствие однозначных признаков первичности включений в нефелине Октябрьского массива (перераспределение материала внутри включения) позволяют полагать, что породы массива кристаллизовались из расплава при температуре и давлении, превосходящих полученные нами (700°С и 1260 атм).

Детальное изучение включений в нефелине позволяет отметить ряд обнаруженных особенностей. Привлекает внимание удивительное сходство морфологии, фазового состава, фазовых соотношений, высоких концентраций растворенных солей, состава газовой фазы, поведения при нагревании (перераспределение материала внутри включений при высоких температурах), температур гомогенизации первичных газовой-жидких включений в нефелине из разных щелочных массивов. Это обстоятельство свидетельствует о сходстве физико-химических условий, существовавших в процессе кристаллизации нефелина и о едином механизме образования первичных включений.

Общим для всех изучавшихся пород является кристаллизация из магматического расплава.

Изучение включений во вторичных минералах (канкрините и содалите), типичных для щелочных пород, представило возможность обнаружить сходство температур канкринитизации и содалитизации в различных щелочных массивах.

Индивидуальные отличия, присущие каждому массиву, связанные, очевидно, с особенностями геологической обстановки, положением в тектонической структуре района, особенностями химизма, содержанием летучих и т. д., отчетливо обнаруживаются при изучении вторичных включений в минералах. веще-

ственно это проявляется в наличии широко развитых процессов трещинообразования в минералах, в отсутствии пневматолитового этапа минералообразования (Ботогольский и Нюрганский массивы), наличии существенно газовых включений, содержащих углеводороды, например, в Ловозерском и Хибинском массивах, присутствии существенно углекислотных включений (Уральский миаскитовый массив), наличии включений со своеобразной твердой фазой (длиннопризматические черные кристаллы, имеющие необычный характер растворения в нефелине ловозерских пород и т. д.

Резюмируя приведенные выше результаты экспериментального изучения минералов щелочных пород, представляется возможным отметить следующее.

Все полученные нами данные по определению температур гомогенизации, давления в момент гомогенизации и состава наиболее высокотемпературных включений при сопоставлении с экспериментальными данными изучения подобных систем и результатами минералого-петрографических исследований свидетельствуют о кристаллизации всех изучавшихся пород из магматического расплава.

Критерии, выдвинутые нами для обоснования первичности наиболее высокотемпературной части включений, в настоящее время еще не имеют экспериментального («автоклавного») подтверждения; работа в этом направлении продолжается. Отметим здесь, что при любом исходе экспериментальной проверки, конечные выводы о кристаллизации изучавшихся пород из расплава сохранят свое значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Кристаллизация изучавшихся щелочных пород осуществлялась из магматического расплава.

2. Нижние температурные пределы начала кристаллизации изучавшихся пород составляют: 850°С (нефелиновые сиениты Ботогольского и Нюрганского щелочных массивов); 980°С (уртиты); 740—720°С (фойяиты и люавриты Ловозера); 950°С (миаскиты Урала); 800°С (миаскитовые пегматиты Ильменских гор); более 700°С (нефелиновые сиениты Октябрьского массива).

3. Нижний предел давлений летучих при кристаллизации изучавшихся пород составляет: более 1470 *атм* (Ботогольский массив); более 1340 *атм* (Нюрганский массив); более 1530 *атм* (Ловозерский массив); более 1400 *атм* (Уральский миаскитовый массив).

4. Состав летучих компонентов, участвовавших в процессах кристаллизации, представлен водой (H₂O) и углекислотой (CO₂). В составе растворов включений присутствовали: Na, K, Ca, Si, Al, Fe, Ti, Cl, F, SO₄, HCO₃. Концентрации солей в растворах высокотемпературных включений составляют от 22 до 46,3 вес. %.

5. Нижний температурный предел вторичных процессов (канкринитизация, содалитизации и т. д.) составляет 400°С.

6. При решении генетических вопросов формирования щелочных пород магматического этапа кристаллизации могут быть применены минералотермометрические методы, дающие достаточно однозначные результаты, апробированные массовыми экспериментальными наблюдениями.

- Айнберг Л. Ф.* Приазовский щелочной массив.— Труды ВГФ, 1933, вып. 196.
- Амеландов А. С.* Материалы к познанию нефелиновых пегматитов Каслинского района на Урале.— Изв. Геол. ком., 1929, 48, № 6.
- Арсентьев В. П.* Краткий очерк тектоники юго-восточной части Восточного Саяна.— Труды Бурятск. компл. научно-исслед. ин-та, серия геол.-геогр., 1960, вып. 2.
- Базаров Л. Ш.* Включения в апатитах из кальцит-флагопитовых жил, пегматитов и гидротермальных жил.— В сб. «Минералогическая термо- и барометрия», т. 2. М., 1965.
- Базаров Л. Ш.* Освещение для исследования мелких включений в микротермокамерах.— Материалы по генетич. и эксперим. мин., 1965, 3.
- Базаров Л. Ш.* Установка для замораживания включений в минералах.— Материалы по генетич. и эксперим. мин., 1966, 4.
- Бакуменко И. Т., Долгов Ю. А., Базаров Л. Ш.* Метод определения давления во включениях с помощью совместного применения гомогенизации и криометрии.— Тезисы докладов на II Всес. по геотермобарометрии. Новосибирск, 1965.
- Белянкин Д. С., Иванова В. П.* Труды Ломоносовского ин-та геохимии, кристаллографии и минералогии и Петрографического ин-та АН СССР, № 6, 1935.
- Беус А. А., Соболев Б. П.* О галоидном переносе элементов в эндогенных процессах. «Экспериментальное исследование в области глубинных процессов». Изд-во АН СССР, 1962.
- Бонштедт-Куплетская Э. М.* Минералогия щелочных пегматитов Вишневых гор. Изд-во АН СССР, 1951.
- Бородин Л. С.* О типах карбонатитовых месторождений и их связи с массивами ультраосновных щелочных пород.— Изв. АН СССР, серия геол., 1957, № 5.
- Бородин Л. С.* О процессах нефелинизации и эгиринизации пироксенов в связи с проблемой генезиса щелочных пород типа ийолитов-мельтейгитов. Изв. АН СССР, серия геол., 1958, № 6.
- Буэн Н. Л., Таттл О. Ф.* Система $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — H_2O . Полевые шпаты. ИЛ, 1952.
- Бутакова Е. Л.* О роли метасоматоза в образовании щелочных пород.— Мин. сб. ЛГО, 1959, № 13.
- Власов К. А.* К вопросу о генезисе пегматитов.— Докл. АН СССР, 1951, 78, № 2.
- Власов К. А.* Генезис редкометальных пегматитов.— Изв. АН СССР, серия геол., 1955, № 5.
- Власов К. А.* Эманационный процесс и кристаллизационная дифференциация как ведущие факторы образования ряда месторождений редких элементов.— В кн. «Вопросы геохимии и минералогии». Изд-во АН СССР, 1956.
- Власов К. А., Кузьменко М. В., Еськова Е. М.* Ловозерский щелочной массив. Изд-во АН СССР, 1959.

- Воробьева О. А.* Петрографо-геохимическая съемка юго-восточной части Ловозерских тундр.— В кн. «Хибинские апатиты», т. 6. Л., 1933.
- Воробьева О. А.* Петрографический очерк Ловозерских тундр.— В кн. «Минералы Хибинских и Ловозерских тундр». Изд-во АН СССР. М.—Л., 1937.
- Воробьева О. А.* Основные структурные черты щелочной интрузии Вишневых гор.— Изв. АН СССР, серия геол., 1947, № 6.
- Воробьева О. А.* Проблема щелочного магматизма. Проблемы магмы и генезиса изверженных пород.— В сб. к 100-летию со дня рождения акад. Ф. Ю. Левинсон-Лессинга, 1963.
- Вукалович М. П.* Термодинамические свойства воды и водяного пара. 6-е изд. Машгиз, 1958.
- Герлинг Э. К. и др.* О возрасте Ловозерских тундр.— Докл. АН СССР, 1941, 31, № 2.
- Григорьев Д. П.* К вопросу о различии первичных и вторичных жидких включений в минералах.— Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1948, № 2.
- Грушкин Г. Г., Приходько П. Л.* Об изменении химического состава, концентрации и pH газовой-жидких включений в ряде последовательных генераций флюорита.— Записки Всес. мин. об-ва, 1952, ч. 81, вып. 2.
- Грушкин Г. Г.* Газово-жидкие включения как геологический манометр.— Записки Всес. мин. об-ва, 1953, ч. 82, вып. 2.
- Додин А. Л., Гурьянова В. Н.* Интрузивные комплексы Восточного Саяна.— Материалы ВСЕГЕИ, 1960, вып. 32.
- Додин А. Л.* Новые данные по стратиграфии и тектонике юго-восточной части Восточного Саяна.— Материалы ВСЕГЕИ, новая серия, 1961, вып. 48.
- Долгов Ю. А., Серебренников А. П.* Техника и результаты термобарических исследований температур по включениям растворов.— Тезисы докладов II Всес. совещ. по геотермобарометрии. Новосибирск, 1965.
- Долгов Ю. А., Базаров Л. Ш., Арнаутов Н. В.* Характер изменения состава растворов в процессе формирования кварц-флюоритоносных пегматитов.— Докл. АН СССР, 1965, 164, № 5.
- Долгов Ю. А., Базаров Л. Ш.* Камера для исследования включений минералообразования растворов и расплавов при высоких температурах.— В сб. «Минералогическая термометрия и барометрия», т. 1. М., 1965.
- Долгов Ю. А., Шугурова Н. А.* Исследование состава индивидуальных газовых включений.— Труды ИГ и ГСО АН СССР (Материалы по генетической и экспериментальной минералогии), 1966, 4, вып. 15.
- Елисеев Н. А. и др.* Геологическое строение и петрографический состав Ловозерских тундр.— Изв. АН СССР, серия геол., 1938, № 2.
- Елисеев Н. А.* К вопросу о классификации нефелиновых горных пород.— Записки Всес. мин. об-ва, вторая серия, 1957, ч. 86, вып. 5.
- Елисеев Н. А., Кушев В. Г., Виноградов Д. Н.* Протерозойский интрузивный комплекс Восточного Приазовья. М.—Л., изд-во «Наука», 1965.
- Ермаков Н. П.* Определение температур образования гидротермальных минералов путем изучения жидких включений.— Докл. АН СССР, 1944, 45, № 5.
- Ермаков Н. П.* Исследования минералообразующих растворов. Харьков, 1950.
- Ермаков Н. П.* Включения маточных растворов в минералах и их значение для теории и практики.— Труды ВНИИП, 1957, 1, вып. 2.
- Ермаков Н. П.* Термометрия глубинных процессов рудообразования.— В сб. «Минералогическая термометрия и барометрия», т. 1. М., 1965.
- Заварицкий А. Н.* Некоторые из образцов графитовых месторождений, принадлежащих минералогической коллекции Горного музея.— Записки Горного ин-та, 1907, 1, вып. 1.
- Заварицкий А. Н.* О роли изверженных пород в строении ильменского петрографического комплекса.— Геол. вестник, 1926/1927, 5, вып. 4—5.
- Заварицкий А. Н.* Геологический и петрографический очерк Ильменского минералогического заповедника и его копей. Главное упр-ние по заповедникам, 1939.

- Заварицкий А. Н., Соболев В. С. Физико-химические основы петрографии изверженных горных пород. Госгеолтехиздат, 1961.
- Захарченко А. И. Минералообразующие растворы и генезис кварцевых жил на опыте изучения кварцевых жил Памира и включений растворов в минералах.— Материалы ВСЕГЕИ, новая серия, 1955, 5.
- Иванова Т. Н. Основные черты закономерностей развития интрузивного магматизма восточной части Алтае-Саянской области.— Бюлл. ВСЕГЕИ, 1961.
- Ильина Н. С. К вопросу о геотектонике Восточных Саян.— Бюлл. МОИП, отд. геол., 1945, 20 (3—4).
- Ингерсон Е. Земная кора. ИЛ, 1958.
- Икорский С. В. О некоторых включениях в нефелине горных пород Хибинского и Ловозерского щелочных массивов.— В сб. «Материалы по минералогии Кольского полуострова. Апатиты», вып. 2. Изд-во Кольского фил. АН СССР, 1961.
- Иодер Х. С. (младший). Система $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ и соответствующие метаморфические фации.— В сб. «Экспериментальные исследования в области петрографии и рудообразования», ИЛ, 1954.
- Калюжный В. А., Колтун В. И. Некоторые данные о давлениях и температурах при образовании минералов Нагольного кряжа (Донбасс).— Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1953, № 7.
- Калюжный В. А. Жидкие включения в минералах как геологический барометр.— Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1955, № 9.
- Калюжный В. А. Методы вивчення багатofазових включень в мінералах. Изд. АН УССР, 1960.
- Калюжный В. А. Исследование минералообразующих сред по включениям в минералах.— Междунар. геол. конгресс Карпато-балканск. ассоциаций. Материалы комиссии минералогии и геохимии, 1961, № 1.
- Керкис Т. Ю. (Базарова), Костюк В. П. Минералотермометрическое изучение ботогольского нефелина (Восточный Саян).— Докл. АН СССР, 1963, 150, № 5.
- Клевцов П. В., Леммлейн Г. Г. Определение условий образования кварца с Южного Урала по жидким включениям CO_2 и водного раствора солей.— Записки Всес. мин. об-ва, 1958, 87, № 2.
- Клевцов П. В., Леммлейн Г. Г. Определение минимального давления образования кварца на примере кристаллов с Памира.— Записки Всес. мин. об-ва, 1959, 88, № 6.
- Кляровский В. М., Костюк В. П. О возрасте щелочных пород восточной части Восточного Саяна.— Докл. АН СССР, 1965, 162, № 2.
- Кобеляцкий И. А. Геологический очерк верхнего течения рек Урика и Онота. Иркутск, 1947.
- Кононова В. А. Уртит-пиолитовые интрузии юго-восточной Тувы и некоторые вопросы их генезиса.— Труды ИГЕМ, 1961, вып. 60.
- Коржинский Д. С. Факторы минеральных равновесий и минералогические фации глубинности.— Труды Ин-та геол. наук АН СССР, петрол. серия, 1940, № 5, вып. 12.
- Коржинский Д. С. Принцип подвижности щелочей при магматических явлениях.— В сб. «К 70-летию академика Д. С. Белянкина». Изд-во АН СССР, 1946.
- Коржинский Д. С. Очерк метасоматических процессов.— В кн. «Основные проблемы в учении о магматических рудных месторождениях». Изд-во АН СССР, 1953.
- Костылева Е. Е., Лобунцов А. Н. К минералогии Ботогольского гольца.— Материалы СОПС, 1925, № 55.
- Криштофович А. Н. Верхнедевонские растения из северо-восточной части Ловозерских тундр Кольского полуострова.— Изв. АН СССР, серия геол., 1937, № 4.
- Крылов И. Н., Мануйлова М. М., Митрофанов Ф. П., Никитин Л. П., Хильгова В. Я. Петрография метаморфических и магматических пород Восточ-

- ного Саяна. Петрография Восточной Сибири, т. II. Изд-во АН СССР, 1962.
- Костюк В. П.* О генезисе щелочных пород Восточного Саяна. Геол. и геофиз. СО АН СССР, 1964, № 9.
- Кузнецов Е. А.* Петротектонические особенности миаскитов.—Вестник Моск. ун-та, 1947, № 7.
- Куплетский Б. М.* 1. Петрографический очерк Алиберовского месторождения графита. (Матер. к изучению русского графита). Изд-во АН СССР, 1925, № 55.
- Куплетский Б. М.* 2. О прените ботогольского гольца.—Докл. Росс. АН, серия А, 1925.
- Куплетский Б. М.* Формация нефелиновых сиенитов СССР. Изд-во АН СССР, 1937.
- Кушев В. Г., Комлев Л. В., Виноградов Д. П.* Геохронология Восточного Приазовья.—В сб. «Абсолютный возраст докембрийских пород СССР». М.—Л., изд-во «Наука», 1965.
- Лавес Ф.* Фазовые отношения щелочных полевых шпатов. II. Полевые шпаты. ИЛ, 1956.
- Леммлейн Г. Г.* Процесс залечивания трещин и преобразование формы включений.—Докл. АН СССР, 1951, 88, № 4.
- Леммлейн Г. Г., Клевцов П. В.* Влияние концентрации на температуру гомогенизации систем, состоящих из водных растворов солей.—Записки Всес. мин. об-ва, 1956, 85, № 3.
- Леммлейн Г. Г.* Классификация жидких включений в минералах.—Записки Всес. мин. об-ва, 1959, II серия, ч. 88, № 2.
- Леммлейн Г. Г., Клия М. О., Островский.* Об условиях образования минералов в пегматитах по данным изучения первичных включений в топазе.—Докл. АН СССР, 1962, 142, № 1.
- Лисицын Л. Е.* Способ приготовления водных вытяжек из минералов, содержащих жидкие и газовые включения.—Бюлл. научно-техн. информ., 1961, № 3.
- Лоскутов А. В.* Электрическая печь с водяным охлаждением корпуса для нагревания под микроскопом.—Записки Всес. мин. об-ва, 1955, 84.
- Лурье М. Л., Обручев С. В.* Докембрий Восточного Саяна и Хамар-Дабана (стратиграфия и магматизм).—Изв. АН СССР, серия геол., 1950, № 6.
- Лурье М. Л., Обручев С. В.* Стратиграфия кембрия Восточного Саяна и бассейна р. Джиды.—Изв. АН СССР, серия геол., 1952, № 1.
- Луцицкий В. И., Лебедев П. И.* Петрография Украины. Петрография СССР, серия 1, вып. 3. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1934.
- Маслова И. Н.* Исследование химического состава включений во флюорите ультрамикрометодом.—Труды Всес. научно-исслед. ин-та пьезосырья, 1958, 2, вып. 2.
- Маслова И. Н.* Ультрамикрхимическое исследование состава жидкой и газовой фаз двухфазовых включений кварцев Вольни.—Геохимия, 1961, № 2.
- Молчанова И. А.* Очерки по геологии Сибири. Восточный Саян. Изд-во АН СССР, 1934.
- Морозевич И. А.* 1. О литологическом составе южнорусской кристаллической площади в пределах Мариупольского уезда.—Изв. Геол. ком., 1898, 17.
- Морозевич И. И.* 2. Геологические исследования, проведенные в Мариупольском уезде летом 1898 г. (Предварительный отчет).—Изв. Геол. ком., 1898, 17.
- Морозевич И. А.* Об одном крайнем члене семейства элеолитовых сиенитов — мариуполите и связанных с ним породах Мариупольского уезда.—Записки СПб. мин. об-ва, 1901, 39.
- Некрасов Б. П.* Алиберовское месторождение графита. Мин. сырье, 1928, № 3.
- Ниггли П.* Магма и ее продукты. Госгеолтехиздат, 1946.
- Николаев В. А.* Диаграмма равновесия бинарных систем типа силикат — вода и отделение летучих соединений из магматических расплавов.—Записки Мин. об-ва, 1945, ч. 74, № 2.

- Обручев В. А.* Докембрий Восточного Саяна. Стратиграфия СССР. Докембрий СССР, т. 1. Изд-во АН СССР, 1939.
- Обручев С. В.* Основные черты тектоники и стратиграфии Восточного Саяна.— Изв. АН СССР, серия геол., 1942, № 5—6.
- Обручев С. В.* Тектоника западной части Саяно-Байкальской каледонской складчатой зоны.— Докл. АН СССР, 1949, 68, № 5.
- Орвил П. М.* Полевые шпаты. Вопросы теоретической и экспериментальной петрологии. ИЛ, 1963.
- Орешкин И. И.* Ботогольское месторождение графита.— Мин. сырье, 1931, № 8—9.
- Перчук Л. Л.* Парагенезис нефелина со щелочным полевым шпатом как возможный показатель термодинамических условий минерального равновесия.— Докл. АН СССР, 1965, 161, № 4.
- Петерсилье И. А.* Геология и геохимия природных газов и дисперсных битумов некоторых геологических формаций Кольского полуострова. Изд-во «Наука», 1964.
- Плешанов С. П.* Некоторые вопросы геологии Восточно-Саянского пегматитового пояса.— Труды I совещ. по металлогении Западного Забайкалья. Вост.-Сиб. фил. АН СССР. Иркутск, 1958.
- Полканов А. А.* Геология, история металлогении и образования полезных ископаемых Кольского полуострова.— В кн. «Проблема Кольского полуострова». Л., Геолразведиздат, 1933.
- Реввердатто В. В.* Метаморфический тримит из контактовометаморфизованных известняков ларвинитмертвинитовой фации.— Докл. АН СССР, 1962, 146, № 3.
- Рик Л. П.* Огнитский интрузивный комплекс.— Материалы по геол. и полезн. ископ. Иркутской обл., 1961, вып. 1 (28).
- Смирнов А. Д., Булдаков В. В.* Интрузивные комплексы Восточного Саяна. Изд-во АН СССР, 1962.
- Смирнов А. Д., Недоумов Н. Б., Булдаков В. В.* Рифейские структуры Восточного Саяна и положение в них пегматитовых полей. Изд-во АН СССР, 1963.
- Соболев В. С.* Петрография Ботогольского щелочного массива. Ботогольское месторождение графита и перспективы его использования. Иркутск, ОГИЗ, 1947.
- Соболев В. С., Флоренсов Н. А.* Генезис ботогольское графита. Сов. геология, 1948, № 32.
- Соболев В. С.* Введение в минералогию силикатов. Изд-во Львовск. ун-та, 1949.
- Соболев В. С.* О роли давления при минералообразовании.— Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1955, № 9.
- Солоненко В. П.* Генезис щелочных пород графита Ботогольского массива.— Изв. АН СССР, серия геол., 1950, № 6.
- Спенсер Э.* 1. Калиево-натриевые полевые шпаты, ч. 1. Полевые шпаты. ИЛ, 1952.
- Спенсер Э.* 2. Калиево-натриевые полевые шпаты, ч. 2. Полевые шпаты. ИЛ, 1952.
- Справочник по растворимости солевых систем. М., 1953.
- Стырикович М. А., Хайбуллин И. Х.* Диаграммы фазовых равновесий систем $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4-\text{H}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$.— Докл. АН СССР, 1956, 109.
- Сулов А. И.* Магматизм Восточного Саяна.— Сов. геология, 1960, № 6.
- Тернер Ф., Ферхуген Д.* Петрология изверженных и метаморфических пород. ИЛ, 1961.
- Уайли П. Г., Таттл О. Ф.* Система $\text{CaO}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$.— ИЛ, 1963.
- Хитаров Н. И., Малинин С. Д.* О равновесных фазовых отношениях в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$.— Геохимия, 1958, № 7.
- Хитаров Н. И.* Содержание и задачи современных экспериментальных исследований в области минералообразования.— Записки Всес. мин. об-ва, 1957, 86, № 2.

- Хитаров Н. И., Лебедев Е. Б., Лебедева Р. Е.* Экспериментальные данные по характеристике образования скарнов, содержащих волластонит. Изд-во АН СССР, 1962.
- Хитаров Д. Н.* Изучение состава и других особенностей газовой-жидких включений в минералах на современном этапе.— В кн. «Минеральные микро-включения». Изд-во «Наука», 1965.
- Ходаковский И. Д., Хитаров Д. Н.* Физико-химические условия образования некоторых редкометалльных месторождений по данным газовой-жидких включений в минералах.— Тезисы докладов II Всес. совещ. по геотермо-барометрии. Новосибирск, 1965.
- Ферсман А. Е.* Минералогия и геохимия Хибинских и Ловозерских тундр.— В кн. «Труды XVII сессии Международного геологического конгресса». Путеводитель. Северная экспедиция. Л.— М., 1937.
- Ферсман А. Е.* Пегматиты, т. 1. Изд-во АН СССР, 1940.
- Флоренсов Н. А.* Геологический очерк Ботогольского месторождения графита в Восточных Саянах.— В кн. «Ботогольское месторождение графита и перспективы его использования». Иркутск, ОГИЗ, 1947.
- Царовский И. Д.* О взаимоотношениях мариуполитов с нормальными породами фойяитового ряда.— Геол. ж. УССР, 1957, т. 17, вып. 1.
- Царовский И. Д.* Нефелиновые сиениты Приазовья и Среднего Придне-провья.— Труды Лабор. геол. докембрия, 1964, вып. 19.
- Цуринов Г. Г., Вольнова В. А.* Универсальный столик к микроскопу для исследова-ний при высоких и низких температурах.— Заводская лабор., 1952, № 10.
- Чайковский С. А.* Явление перегрева жидких включений в минералах.— Докл. АН СССР, 1951, 76.
- Шейнман Ю. М., Апальцин Ф. Р., Нечаева Е. А.* Закономерности размещения комплексов щелочных пород и связанной с ними минерализации.— В сб. «Металлогения докембрийских щитов и древних подвижных зон». Киев, 1960.
- Шерер Д. Ф.* Щелочно-полевошпатовый разрез в системе $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — SiO_2 . Полевые шпаты. ИЛ, 1952.
- Эйтель В.* Физическая химия силикатов. ИЛ, 1962.
- Ячевский Л.* Алиберовское месторождение графита на Ботогольском гольце.— Геол. исслед. по линии Сиб. ж. д., вып. II. СПб., 1899.
- Яшина Р. М.* Щелочные породы Юго-Восточной Тувы.— Изв. АН СССР, се-рия геол., 1957, № 5.
- Яшина Р. М.* О новой провинции щелочных пород Юго-Восточной Тувы.— Докл. АН СССР, 1955, 105, № 6.
- Bowen N. L.* The behaviour of inclusions in igneous magma.— J. Geol., 1922, 30.
- Vocle H. E.* Grundlagen der physikalisch-chemischen Petrographie. 2 Aufl. Berlin, 1923.
- Eckermann V.* The Rapakivi facts, an answer to a reply.— Geol. foren. i-Stock-holm forhandl., 1938, 60.
- Gilluly I.* Origin of granite. Conf. Meet. Geol. Soc. America, Ottawa, 139 S, 1948.
- Goranson R. W.* The solubility of water and granite magmas.— Amer. J. Sci., 1931, 22.
- Goranson R. W.* Silicate-water system. The solubility of water in albite melts.— Trans. Amer. Geophys. Union, 1936, 17.
- Goranson R. W.* Silicate-water systems: The osmotic pressure of silicate melts.— Amer. Mineralogist, 1937, 22.
- Goranson R. W.* Temperature-pressure-volume and phase relations of water. Handbook of Phys. Constants, Geol. Soc. America, Spec. Papers, 1942, N 36.
- Ingerson E.* Liquid inclusions in geologic termometry.— Amer. Mineralogist, 1947, 32.
- Ingerson E.* Methods and problems of geologic termometry.— Econ. Geol., 1955, 50, N 1.

- Johnsen A.* Über die Paragenese I. Quarz und Kohlensäure. Sitzungsber.—Bayer Akad. Wiss. Math.-phys. Kl., 1885.
- Hamilton D. L., MacKenzie W. S.* Nepheline solid solution in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{—SO}_2$.—*J. Petrol.*, 1960, N 1.
- Hamilton D. I.* Nepheline as crystallisation temperatures indicators.—*J. Geol.*, 1961, N 69.
- Holden E. E.* The case of color in smoky quartz and amethyst.—*Amer. Mineralogist*, 1925, 10.
- Kennedy G. C.* Pressure-volume-temperature relations in water at pressures.—*Amer. J. Sci.*, 1950, 4, N 1.
- Kennedy G. C.* Pressure-volume-temperature relations in CO_2 at elevated temperatures and pressures.—*Amer. J. Sci.*, 1954, 252.
- Königsberger I.* Die Minerallagerstätten in Biotitprotogin des Aar massivs.—*Neues Jahrb. Mineral., Beil.-Bd.*, 1901, 14.
- Lehman E.* Eruptivgesteine und Eisenerze in Mittel- und Oberdevon der Zahnmulde. Wetzlar, 1941.
- Morozevich I. A.* Der Mariupolit und seine Blutsverwandten.—*Mineral. und petrogr. Mitt.*, 1930, 40, H. V—VI.
- Nacken R.* Welche Folgerungen ergeben sich aus dem Auftreten von Flüssigkeitseinschlüssen in Mineralien? —*Zbl. Mineral.*, 1921.
- Newhouse W. H.* The temperature of formation of the Mississippi Valley lead-zinc deposits.—*Econ. Geol.*, 1933, 28.
- Phillips I. A.* The rocks of the mining districts of Cornwall and their relation to metalliferous deposits.—*J. Geol. Soc. London*, 1875, 31.
- Ramsay W.* Das nephelinsyenitgebiet auf der Halbinsel Kola.—*Fennia*, 1897—1899, 15, N 2.
- Robertson E. C., Birch F., MacDonald G. J. F.* Experimental determination of Ladeite stability relations to 25000 bars.—*Amer. J. Sci.*, 1957, 255.
- Roedder E.* Studies of fluid inclusions. Freezing data and their interpretation.—*Econ. Geol.*, 1963, 58, N 2.
- Roedder E.* Technique for the extraction and partial chemical analysis of fluid-filled inclusions from minerals.—*Econ. Geol.*, 1960, 53, N 3.
- Roy R., Osborn E. F.* The system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—H}_2\text{O}$.—*Amer. Mineralogist*, 1954, 39, N 11—12.
- Smith F. G.* The pyrite geothermometer.—*Econ. Geol.*, 1947, 42, N 6.
- Sorby H. C.* On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks.—*J. Geol. Soc.*, 1858, 14.
- Sourirajan S., Kennedy G. C.* The system $\text{H}_2\text{O—NaCl}$ at elevated temperatures and pressures. Univ. Calif. Radiation Lab., USKL, 1960.
- Sourirajan S. and Kennedy G.* The system $\text{H}_2\text{O—NaCl}$ at elevated temperatures and pressures.—*Amer. J. Sci.*, 1962, 260.
- Takenouchi S. and Kennedy G.* The binary system $\text{H}_2\text{O—CO}_2$ at high temperatures and pressures.—*Amer. J. Sci.*, 1964, 263.
- Takenouchi S. and Kennedy G.* The solubility of carbon dioxide in NaCl solutions at high temperatures and pressures.—*Amer. J. Sci.*, 1965, 263.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
 Часть I	
<i>Особенности геологического строения районов развития изучавшихся щелочных пород</i>	<i>6</i>
Ботогольский и Нюрганский щелочные массивы (восточная часть Восточного Саяна)	6
Ловозерский щелочной массив	9
Уральский миаскитовый массив	12
Октябрьский массив (Восточное Приазовье)	12
<i>Минералого-петрографическая характеристика изучавшихся пород</i>	<i>14</i>
Ботогольский и Нюрганский щелочные массивы	14
Ловозерский щелочной массив	24
Уральский миаскитовый массив	28
Октябрьский массив	30
 Часть II	
<i>Методы исследования</i>	<i>32</i>
Определения температур гомогенизации	33
Вопросы первичности включений	36
Определение давления при минералообразовании	39
Определение состава включений в минералах нефелинсодержащих пород	45
 Часть III	
<i>Результаты экспериментальных исследований</i>	<i>50</i>
Температурные условия формирования изучавшихся щелочных пород	50
Ботогольский щелочной массив	51
Нюрганский щелочной массив	63
Ловозерский щелочной массив	65
Уральский миаскитовый массив	74
Октябрьский массив (Восточное Приазовье)	82
Давление летучих при формировании массивов изучавшихся щелочных пород	85
Состав растворов во включениях в минералах изучавшихся щелочных пород	90
Физико-химические условия кристаллизации изучавшихся пород	96
<i>Заключение</i>	<i>103</i>
Литература	104

Татьяна Юльевна Базарова
**Термодинамические условия
формирования некоторых нефелинсодержащих пород**

*Утверждено к печати
Институтом геологии и геофизики Сибирского отделения*

Редактор издательства *М. И. Азизян*
Технический редактор *И. Н. Жмуркина*

Сдано в набор 16/X 1968 г. Подписано к печати 20/I 1969 г.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 2. Усл. печ. л. 7
Уч.-изд. л. 6,8. Тираж 800 экз. Т-00925. Тип. зак. 5407

Цена 68 коп.

Издательство «Наука».
Москва, К-62, Подсосенский пер., д. 21
2-я типография издательства «Наука».
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10