

**Санкт-Петербургский государственный университет**

На правах рукописи

**РГБ ОД**

**03 ОКТ 2000**

Янсон Светлана Юрьевна

**МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ФОРМИ-  
РОВАНИЯ ЛАЗУРИТОВЫХ МЕТАСОМАТИТОВ**

Специальность 04.00.20 – минералогия, кристаллография

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург  
2000

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор В.Г.Кривовичев

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук, профессор Э.М.Спиридонов

доктор геолого-минералогических наук, профессор А.Э.Гликин

Ведущая организация: Геммологический центр Московского государственного университета

Защита состоится «25» мая 2000г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 063.57.27 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9, геологический факультет, ауд. 44)

Автореферат разослан «21» апреля 2000г.

Ученый секретарь совета,  
Доктор геол.-мин- наук

А.Б.Кольцов

20452.819-0,0

Лазурит — великолепный минерал синего цвета издавна известен и любим, будучи одним из наиболее ценных ювелирно-поделочных материалов. Синий цвет достаточно редок в минеральном царстве и, возможно поэтому, ляпис-лазурь на протяжении шести тысячелетий остается одним из любимых камней мастеров-ювелиров, создающих из него уникальные произведения искусства. Многие изделия из ляпис-лазури хранятся в крупнейших музеях мира как шедевры камнерезного мастерства.

По классификации В.Я.Киевленко (1980) лазурит относится к группе ювелирно-поделочных камней I порядка. Собственно поделочным сырьем является, однако, не сам лазурит, а полиминеральная микро- и мелкозернистая горная порода, в которой лазурит является лишь одной из составных частей. Для ляпис-лазури характерны неоднородность состава, строения, окраски и, соответственно широкий спектр художественно-декоративных свойств. Ювелирно-поделочные качества лазуритсодержащей породы определяются окраской лазурита, его количеством в породе, однородностью распределения, формами выделения и зернистостью лазуритсодержащих агрегатов. В высококачественном сырье содержание лазурита составляет 25–40 об.%. При меньшем его содержании порода имеет слишком светлые тона, а если лазурита в породе более 40 об.%, то при полировке камень приобретает нежелательные темные оттенки.

Несмотря на давнюю известность, лазуритовым месторождениям посвящено сравнительно небольшое количество работ. Основные вопросы геологии, петрологии и генезиса лазуритовых месторождений изложены в работах Д.С.Коржинского (1945, 1947), Е.Д.Поляковой (1932), Н.В.Воскобойниковой (1938), А.Е.Ферсмана (1962), И.А.Ефимова, А.И.Судеркина (1967), Е.И.Воробьева (1983 и др.), Д.Хогарта и У.Гриффина (Hogarth, Griffin 1971, 1975, 1976, 1978). В работах В.Г.Иванова и А.Н.Сапожникова (1973, 1975, 1985, 1990 и др.) обобщены результаты петролого-минералогических исследований, выделены основные этапы формирования лазуритовых месторождений, определено место лазуритообразования в общей последовательности минералообразующих процессов, а также установлены новые структурные модификации лазурита.

*Актуальность работы* обусловлена тем, что до настоящего времени не разработана количественная физико-химическая модель формирования лазуритовых месторождений на основе сопоставления их геологоструктурного положения, особенностей минерального состава и строения основных типов метасоматических колонок с целью выявления сходства и различия в условиях формирования этих месторождений. Это и являлось *основной целью* настоящей работы, включающей в себя комплекс-

ный анализ геолого-петрографических и минералогических исследований особенностей лазуритсодержащих пород и физико-химических условий их образования.

Для достижения цели работы были выполнены:

1. Анализ и обобщение имеющихся данных по геологической позиции месторождений лазурита с целью выяснения основных типов лазуритовой минерализации.

2. Детальная петрографическая характеристика лазуритсодержащих пород, изучение морфологии, химического состава и свойств лазурита и сопутствующих минералов, а также выявление устойчивых парагенетических ассоциаций минералов с целью построения частных и общих метасоматических колонок.

3. Парагенетический анализ лазуритсодержащих метасоматитов и разработка количественной физико-химической модели их формирования на основе комплексного анализа геолого-петрографических и минерало-геохимических данных, а также результатов оценки основных параметров минералообразующей среды термобарогеохимическими методами.

Цель работы определила и *методы исследования*, необходимые для решения сформулированных выше задач. Прежде всего, это традиционные петрографические, минералогические и петрохимические методы, которые позволили установить минеральный состав изученных лазуритовых пород, а также выявить особенности строения метасоматических колонок. В процессе работы было изучено более 150 прозрачных петрографических шлифов, получено 230 микрондовых анализов минералов, с помощью гониометрических измерений и электронной микроскопии изучена морфология 9 кристаллов. Проведено рентгенографическое изучение 15 образцов лазурита для определения его структурных модификаций. Для шести образцов лазурита различной окраски получены спектры оптического отражения. Вторая группа методов включает физико-химический анализ минеральных равновесий в системе  $K-Na-Ca-Mg-Al-Si-CO_2-H_2O$  с построением диаграмм в различных координатах, а также термобарогеохимические методы (гомогенизация газожидких включений в минералах, использование диаграмм фазового соответствия). Третья группа методов включает обработку аналитических данных на ЭВМ; большинство алгоритмов для них составлено автором.

**Фактический материал.** В основу работы легли материалы систематических коллекций кафедры минералогии Санкт-Петербургского государственного университета по месторождениям Памира и Прибайкалья, а также образцы лазурита из лавовых потоков Везувия. Большая

часть материалов Ляджвардаринского месторождения была предоставлена доцентом кафедры минералогии А.А.Золотаревым. Отдельные интересные образцы лазурита были подарены автору докт.геол.-мин. наук В.А.Поповым (ИМ УрО РАН, Миасс) и докт.геол.-мин. наук М.А.Ивановым (СПБГИ). В процессе работы были просмотрены коллекции музеев Санкт-Петербургского Горного института и Ильменского заповедника УрО РАН.

**Научная новизна и практическая значимость.** Выделено три типа лазуритовой минерализации. Проведено гониометрическое измерение и микроморфологическое изучение кристаллов лазурита, образовавшихся в различных условиях. Проведен термодинамический анализ минеральных равновесий в системе  $K-Na-Ca-Mg-Al-Si-CO_2-H_2O$ , в результате которого установлены наиболее вероятные условия формирования лазуритовых метасоматитов. Практическая значимость комплексного изучения лазуритсодержащих метасоматитов определяется тем, что его результаты могут быть использованы как при разработке поисково-оценочных признаков на наличие лазуритовой минерализации, а также использоваться при оценке декоративно-поделочных качеств камнецветного сырья. Кроме того, результаты работы используются в курсах «Самоцветы России» и «Физико-химическая минералогия», читаемых магистрам геологического факультета СПбГУ. Результаты гониометрического изучения лазуритов включены в справочник «Минералы».

#### **Защищаемые положения.**

1. Выделены три типа лазуритовой минерализации. Для *первого типа* характерно развитие лазурита по микроклину на контакте гранита и доломитового мрамора. Во *втором типе* лазурит замещает плагиоклаз с появлением маломощной плагиоклазитовой зоны между зонами полевошпатовых и диопсид-лазуритовых пород. В *третьем типе лазурит* развивается по шпинели и силикатам скарнов и скарнированных мраморов.

2. По условиям образования кристаллы лазурита можно разделить на метакристаллы, выросшие в твердой среде, для которых характерны неровные поверхности граней, осложненные наличием микроскульптурных образований. Грани кристаллов, сформировавшихся в условиях свободного роста (в пустотах или открытых трещинах) отличаются ярким блеском и ровными поверхностями. Габитус кристаллов лазурита обусловлен преимущественным развитием граней ромбододекаэдра. Ребра и вершины кристаллов лазурита сглажены слабо развитыми гранями пентагон-триоктаэдров {134}, {123} и {234}, тетрагон-триоктаэдров {131} и {151}, тетрагексаэдров {031} и {120} и куба {010}.

3. Формирование апоаломосиликатных лазуритовых метасоматитов происходило при инертном поведении Al и Mg в рамках открытой системы при температурах 500-650°C на контакте химически неравновесных сред, что обуславливало встречную диффузию компонентов с удалением CO<sub>2</sub> с места протекания реакций. В отличие от апоаломосиликатных лазуритовых метасоматитов, при формировании апоскарновых лазуритов Al, Si и Mg ведут себя инертно и основной причиной их формирования являются вариации химических потенциалов калия и натрия в минералообразующей среде.

*Апробация работы и публикации.* Материалы работы докладывались на Уральских летних минералогических школах (Екатеринбург, 1998, 1999); Международном совещании «Минералогические музеи» (Санкт-Петербург, 1998); семинарах «Ювелирное искусство и материальная культура» (Санкт-Петербург, 1998, 1999) и IX Съезде ВМО РАН «Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XX века». По теме исследований опубликовано 7 работ.

На всех этапах проведения работы автор пользовался советами и вниманием со стороны научного руководителя проф. В.Г.Кривовичева. Большое содействие при выполнении различных исследований автор получил от зав.лаб. А.Р.Нестерова, ст.научн.сотр. Г.Ф.Анастасенко, доц. Н.И.Пономаревой, доц. А.А.Золотарева, инж. В.А.Кузнецова, доц. А.А.Антонова, доктора геол.-мин. наук Е.Н.Котельниковой доц. М.Д.Евдокимова, инж. В.В.Михайлова, канд. геол.-мин. наук Ю.Л.Крестера (Механобр «Аналит»), программиста Н.С.Овчинниковой (СПбГУ). Отдельные разделы работы обсуждались с докт. геол.-мин. наук В.А.Поповым (ИМ УрО РАН, Миасс), канд. геол.-мин. наук А.Н.Сапожниковым (ГЕОХИ РАН, Иркутск), проф. Ю.О.Пунинным (СПбГУ).

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Интеграция» («Уральская минералогическая школа», проект № К-0310).

Всем, кто способствовал выполнению настоящей работы, автор выражает свою искреннюю признательность.

*Объем работы.* Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения; содержит 110 страниц машинописного текста, 26 таблиц и 82 рисунка. Список литературы включает 73 наименования.

### Содержание работы

1. В настоящее время в мире известно три крупных группы промышленных месторождений япис-лазури: Афганская, Прибайкальская, Чилийская. Существуют также проявления лазурита в США (округ Ганни-

сон, штат Колорадо, округ Сан-Бернардино в Калифорнии), Канаде, Туркестано-Алае, Мьянме, Индии, ЮАР. Вкрапления лазурита найдены в вулканических туфах Альбанских гор (провинция Альбано, Италия). Многие находки лазурита не имеют промышленного значения и интересны только с научной точки зрения. Для всех крупных промышленных месторождений лазурита (за исключением чилийских, геологическая позиция которых не вполне ясна) выявляются общие геологические условия лазуриобразования, к которым прежде всего относится приуроченность месторождений лазурита к сложнодислоцированным толщам доломитовых мраморов, претерпевших метаморфизм в условиях гранулитовой и амфиболитовой фаций (отличительной чертой этих мраморов является их зараженность первично-осадочной серой) и наличие в них будинированных тел интрузивных алюмосиликатных пород, за счет которых образуется основная масса ляпис-лазури. Лазуриносодержащие породы развиваются на контакте будин алюмосиликатных пород с вмещающими их магнезиальными мраморами.

Несколько иная геологическая позиция характерна для лазуриносодержащих пород шт. Колорадо (Italian Mountain) и Туркестано-Алая (Зардалекский массив). Здесь лазуриносодержащие породы образуются на контакте массивов щелочно-ультраосновных магматических пород с вмещающими их карбонатными толщами, представленными известняками и доломитами палеозойского возраста.

Следует также отметить находки лазурита в вулканических горных породах (Италия) как особый тип лазуриносодержащей минерализации.

2. В промышленных месторождениях лазурита основная масса лазуриносодержащих метасоматитов приурочена к контактам измененных алюмосиликатных пород с карбонатными, где они слагают отдельные зоны биметасоматических колонок. Кроме того, в скарнах, мраморах и внутри тел гранитоидов лазуриносодержащие метасоматиты формируют внеконтактовые (иногда на значительных расстояниях от контакта) неправильные тела в виде гнезд, ветвящихся просечек, пятен, полос с неровными краями и нечетко выраженными реакционными зонами.

В результате интенсивных процессов лазуриобразования будины гранитов могут быть замещены полностью. Зональность лазуриносодержащих тел нестабильна, присутствие всех составляющих метасоматической колонки необязательно. Мощности отдельных зон метасоматических колонок могут изменяться в пределах одного лазуриносодержащего тела вплоть до выклинивания отдельных зон.

Отчетливо выделяются три типа лазуриносодержащей минерализации (рис. 1):

1) замещение калиевого полевого шпата лазуритом или лазурит-диопсидовыми прорастаниями; 2) лазуритизации предшествует процесс альбитизации калиевого полевого шпата; 3) лазурит развивается по шпинели и силикатам скарнов и скарнированных мраморов.

*Первый тип лазуритовой минерализации.*

1-A	I	II	III	IV	V	VI <sup>a</sup>	VI <sup>o</sup>
	Kf+Q (Bi, Pyr)	Kf+Di	Di+Laz	Ph ( $\pm$ Di, Laz)	Ka+Di+Ph ( $\pm$ Laz)	Ka+Fo ( $\pm$ Spl)	Dol
1-B	I-a	II-a	III	IV	V	VI <sup>a</sup>	VI <sup>o</sup>
	Kf(Ort)+Pl (Ol) $\pm$ Ne	Kf+Laz	Di+Laz	Ph ( $\pm$ Di, Laz)	Ka+Di+Ph ( $\pm$ Laz)	Ka+Fo ( $\pm$ Spl)	Dol

*Второй тип лазуритовой минерализации.*

2-A	I	II	II-б	III	IV	V	VI <sup>a</sup>	VI <sup>o</sup>
	Kf+Q (Bi, Pyr)	Kf+ Di	Pl(Ab, Ol)+Di	Di+ Laz	Ph ( $\pm$ Di, Laz)	Ka+Di+Ph ( $\pm$ Laz)	Ka+Fo ( $\pm$ Spl)	Dol
2-B	I	II	II-в	III-б	IV	V	VI <sup>a</sup>	VI <sup>o</sup>
	Kf+Q (Bi, Pyr)	Kf+ Di	Pl(An, Bit) + Sc	Ph+ Laz	Ph ( $\pm$ Di, Laz)	Ka+Di+Ph ( $\pm$ Laz)	Ka+Fo ( $\pm$ Spl)	Dol
2-B	I-б	II-г	III-а	III-б	IV	V	VI <sup>a</sup>	VI <sup>o</sup>
	Pl (And, Bit)	Sc	Laz+ Pl(Ol)	Ph+Laz	Ph ( $\pm$ Di, Laz)	Ka+Di+Ph ( $\pm$ Laz)	Ka+Fo ( $\pm$ Spl)	Dol

*Третий тип лазуритовой минерализации.*

3	I	III-в	IV	V	VI <sup>a</sup>	VI <sup>o</sup>
	Di $\pm$ Spl; Fo $\pm$ Spl	Laz+Di ( $\pm$ Spl); Laz+Fo ( $\pm$ Spl)	Ph ( $\pm$ Fo, Di, Laz)	Ka+Di+Ph ( $\pm$ Laz)	Ka+Fo ( $\pm$ Spl)	Dol

Рис. 1. Основные типы метасоматических колонок

*Условные обозначения:* Kf - калиевый полевой шпат, Ort - ортоклаз, Pl - плагиоклаз, Ab - альбит, Ol - олигоклаз, And - андезин, Bit - битовнит, An - анортит, Bi - биотит, Di - диопсид, Dol - доломит, Ka - кальцит, Q - кварц, Laz - лазурит, Ne - нефелин, Pyr - пироксен, Sc - скаполит, Ph - флогопит, Fo - форстерит, Spl - шпинель.

*Исходные алюмосиликатные породы:* I - гранит, I-a - сиенит или нефелиновый сиенит, I-б - анортзит, I-в - шпинель-диопсидовый или шпинель-форстеритовый скарн. *Метасоматиты:* II - диопсидированный гранит или микроклинит, II-a - полевошпат-лазуритовый, II-б - плагиоклаз-диопсидовый, II-в - плагиоклаз-скаполитовый, II-г - скаполитовый, III - диопсид-лазуритовый, III-a - диопсид-плагиоклазовый, III-б - флогопит-лазуритовый, III-в - диопсид-лазуритовый или форстерит-лазуритовый, IV - флогопитовый, V флогопит-диопсид-лазуритовый. *Исходные карбонатные породы:* VI<sup>б</sup> - мрамор, VI<sup>a</sup> - форстеритсодержащий мрамор.



3. Большинство апоалюмосиликатных лазуритовых метасоматитов представлено биминеральными породами, состоящими, в основном, из лазурита и диопсида. Апокарбонатные лазуритоносные метасоматиты сложены преимущественно кальцитом и лазурином, который выделяется, как правило, в виде вкрапленных в кальцит отдельных кристаллов. Флогопит формирует мономинеральную зону между лазуриновой породой и карбонатной толщей и развивается по лазуриту и диопсиду. Кроме лазурита, диопсида и флогопита лазуриновые породы могут содержать и в различной степени переработанные реликты исходных пород, которые сложены в основном полевыми шпатами. В случае развития лазуриновых метасоматитов по апортозитам и нефелиновым снейгитам, реликтовыми минералами могут быть нефелин или скаполит. В апокарбонатных и апокарбонатных метасоматитах реликтовые минералы представлены доломитом, форстеритом и шпинелью. Среди минералов лазуриновых метасоматитов особое место занимают афганит и кальцит. Афганит обычно встречается в небольших количествах и может быть отнесен к второстепенным или аксессуарным минералам. Скрытокристаллические агрегаты кальцита развиваются по трещинам, плоскостям спайности минералов и в их межзерновом пространстве, образуя в породе сложную сеть прожилков, в которых кроме кальцита встречаются кристаллики пирита и серы. Вторичными минералами являются амфибол, развивающийся по диопсиду, серпентин, образующий каймы вокруг форстерита, цеолиты, и гематит, замещающий магнетит. Аксессуарные минералы представлены, в основном, апатитом и пиритом, которые в небольших количествах всегда содержатся в лазурититах. Иногда вместе с пиритом встречается пирротин.

Выделены две генерации лазурита. Лазурит-I слагает основную массу микрокристаллических лазуриновых метасоматических пород. Лазурит-II представлен анхимономинеральными зернистыми агрегатами, приуроченными к участкам перекристаллизации лазурита-I.

Наиболее обычными формами выделения лазурита являются микрозернистые, часто скрытокристаллические агрегаты, которые сложены микродиабластовыми сращениями лазурита с диопсидом. Размер зерен лазурита в таких породах обычно колеблется от 0.01 до 0.001 мм. Более крупные индивиды лазурита (до 1 мм) встречаются в лазуриновых породах в виде вкрапленности или секущих прожилков мощностью до 1 см и протяженностью до 10 см, которые сложены почти нацело идиоморфными индивидами лазурита изометричной формы. В апокарбонатных метасоматитах лазурит встречается в виде вкрапленных в кальцит отдельных крупных (до 3-5 мм и более) кристаллов. Лазурит из вулкано-

женных пород представлен микрозернистым (0,01-0,1 мм) агрегатом, но встречаются и более крупные (до 3 мм) кристаллы. Окраска лазурита меняется от ярко-синей (иногда с фиолетовыми оттенками) до нежно голубой; часто встречаются зеленые разности минерала. Существуют и необычные розовые лазуриты.

По условиям образования кристаллы лазурита можно разделить на метакристаллы, выросшие в твердой среде, и кристаллы, возникшие в условиях свободного роста (в пустотах или открытых трещинах). К первой группе относятся голубые и синие метакристаллы лазурита пойкилитовой структуры, которые часто имеют зональное строение, обусловленное различными соотношениями захваченных в процессе роста минералов. Кристаллы лазурита, выросшие в условиях свободного роста, отличаются от метакристаллов скульптурой граней и наличием более совершенной кристаллографической огранки.

Гониометрическое изучение кристаллов лазурита показало (рис. 2), что их габитус обусловлен гранями ромбододекаэдра. Ребра кристаллов лазурита сглажены слаборазвитыми гранями пентагон-триоктаэдров  $\{134\}$  и  $\{123\}$ , а вершины притуплены гранями пентагон-триоктаэдра  $\{234\}$ , тетрагон-триоктаэдров  $\{131\}$  и  $\{151\}$ , тетрагексаэдров  $\{031\}$  и куба  $\{010\}$ .

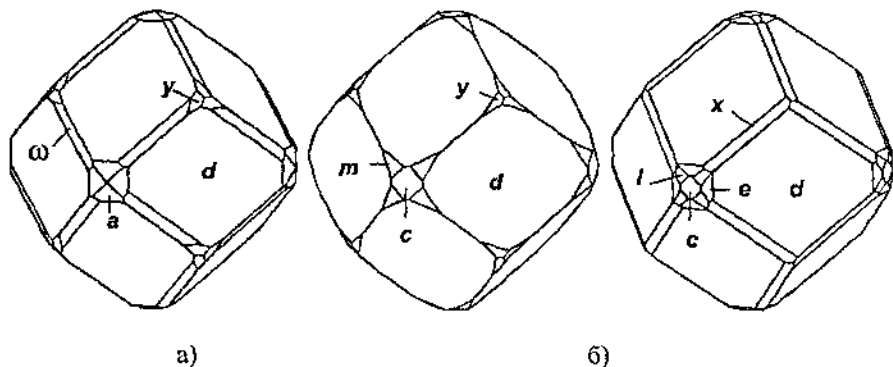


Рис. 2: а) кристалл лазурита из Ляджвардаринского месторождения (Ю-З Памир):  $d - \{110\}$ ,  $a - \{031\}$ ,  $y - \{234\}$ ,  $\omega - \{134\}$ ; б) кристаллы лазурита из вулканогенных пород Италии:  $d - \{110\}$ ,  $c - \{100\}$ ,  $e - \{021\}$ ,  $y - \{234\}$ ,  $x - \{234\}$ ,  $m - \{113\}$ .

В результате микроморфологических исследований кристаллов лазурита обнаружен невидимый при небольшом увеличении рельеф граней, осложненный наличием микроскульптурных образований, которые раз-

личны для кристаллов, образовавшихся в разных условиях. Так, грани кристаллов лазурита, выросшие в открытых полостях, отличаются ярким стеклянным блеском и ровными поверхностями. На гранях же метакристаллов лазурита отчетливо видны штрихи, субиндивиды, треугольные вклинали, образование которых вероятно обусловлено стесненными условиями роста. Поверхности граней кристаллов лазурита из вулканических пород имеют кавернозное строение, часто встречаются сильно расчлененные меандрово-ячеистые углубления.

Лазуриты часто обнаруживают двупреломление как с нормальными, так и с аномальными цветами интерференции. Индивиды лазурита-1 всегда оптически изотропны. Среди лазуритов-II встречаются как изотропные, так и анизотропные разновидности, которые принадлежат более низкой, чем кубическая, симметрии: триклинной, моноклинной и ромбической. По внешнему виду и парагенетическим ассоциациям все лазуриты не отличаются друг от друга.

Пересчет микрзондовых анализов лазурита на типовую формулу довольно сложен, поскольку неизвестны формы вхождения серы в структуру минерала. Вместе с тем, именно расчет формул лазурита позволяет, хоть и достаточно приближенно, оценить ионные группировки серы и их относительные содержания в кристаллической решетке минерала. Спектры ЭПР лазурита показывают наличие в его структуре парамагнитных центров, которые идентифицируются с молекулярными радикалами  $S_2^-$  и  $SO_4^-$  (а также  $S_2O^-$ ,  $SO_2^+$ ,  $SO_2^-$ ). Эти радикалы размещаются в полостях решетки лазурита на месте  $S_2^{2-}$  и  $SO_4^{2-}$ . Пересчет химических анализов лазурита на типовую формулу с учетом вхождения в полости каркаса его структуры различных радикалов позволяет достигнуть электронейтральности формул для большинства проанализированных образцов.

По содержанию большинства ведущих компонентов лазуриты разных месторождений имеют довольно постоянный состав. Установлены лишь незначительные колебания катионов в позиции А. Так, в лазуритах месторождения Baffin Island (Канада) отмечено повышенное содержание натрия и наиболее низкие концентрации кальция. Лазуриты из вулканических лав, напротив, содержат повышенные количества кальция и калия при минимальном количестве натрия. Сопоставление химических составов разноокрашенных лазуритов показало, что интенсивно окрашенные ярко-синие лазуриты содержат повышенные количества серы, а ослабленные окраски до голубой, зеленой и розовой сопровождается понижением концентраций этого элемента. Обратная зависимость установлена для кальция, содержания которого возрастают от синих лазуритов к его ро-

зовым разностям. Для лазуритов розового цвета характерны повышенные содержания хлора и марганца в.

4. Компоненты, слагающие отдельные зоны метасоматических колонок, развивающихся на контакте алюмосиликатных и карбонатных пород, разделяются на две группы: а) компоненты, содержание которых закономерно уменьшается от зоны I к зоне VI (см. рис. 1). К ним относятся Si, Al, Na и K; б) компоненты, концентрации которых также закономерно уменьшаются в обратном направлении (Mg, Ca). Причем, не отмечается привноса каких-либо компонентов извне и процессы лазуритовой минерализации основаны на перераспределении компонентов между химически неравновесными породами.

Большинство зон колонок апоалюмосиликатных метасоматитов имеет биминеральный или мономинеральный состав. Следовательно, согласно правилу фаз, при формировании лазуритовых метасоматитов два компонента были инертны (Mg, Al). Процесс десиликации является основным процессом метасоматического изменения магматических пород. Состав апоскарновых лазуритовых метасоматитов определяется тремя минералами и, соответственно, тремя инертными компонентами.

Температурный интервал формирования лазурита оценивается в 500–650°C. Причем интервал температуры образования кубического лазурита сужаются до 550–650°C.

В качестве геологической основы для физико-химических построений использованы наблюдения над особенностями строения и минерального состава метасоматических колонок, развивающихся на контакте гранитов и доломитовых мраморов. Общей особенностью всех метасоматических колонок является смена более обогащенных кремнеземом минералов менее обогащенными по направлению от гранитоидов к доломитовым мраморам.

В качестве модельной нами выбрана система K—Na—Ca—Mg—Al—Si—CO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O, в рамках которой описываются наиболее распространенные породы исходного субстрата (гранитоиды, доломитовые мраморы и др.) с развивающимися по ним вторичными минералами.

Для определения условий формирования минеральных парагенезисов, слагающих зоны метасоматических колонок были построены парагенетические диаграммы минеральных равновесий по методу Д.С.Коржинского. Минеральный состав апоалюмосиликатных лазуритовых метасоматитов определялся соотношением в них двух инертных компонентов (Mg, Al). В качестве виртуальных вполне подвижных компонентов приняты кремний, натрий и углекислота, а в качестве избыточного компонента — кальций.

Термодинамические расчеты минеральных равновесий выполнены для  $t=550$  и  $650^{\circ}\text{C}$  и  $P=1$  кбар. Для других параметров приняты следующие значения:  $a_{\text{Al,Mg,Ca}}=10^{-4}$ ,  $a_{\text{Na,K}}=10^{-1}$ . Проведен качественный и количественный анализ фазовых диаграмм в координатах  $\mu_{\text{SiO}_2}-\mu_{\text{CO}_2}$ ,  $\mu_{\text{SiO}_2}-\mu_{\text{Na}^+}$ ,  $\mu_{\text{K}^+}-\mu_{\text{Na}^+}$ ,  $\lg a_{\text{H}_4\text{SiO}_4}-\lg a_{\text{CO}_2}$ ,  $\lg a_{\text{H}_4\text{SiO}_4}-\text{pH}$ ,  $\lg a_{\text{H}_4\text{SiO}_4}-\lg a_{\text{Na}^+}$ .

Полученные данные показывают (рис. 3), что ассоциация  $\text{Kf}+\text{Dol}$  устойчива при высокой активности кремнекислоты и фугитивности  $\text{CO}_2$ , при понижении фугитивности  $\text{CO}_2$  (например, вследствие повышения мольной доли воды во флюиде  $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$ ) доломит становится неустойчивым и происходит образование диопсида с формированием парагенезиса  $\text{Kf}+\text{Di}$ . Понижение активности кремнекислоты приведет к формированию лазурита, который будет устойчив в ассоциации с диопсидом. Дальнейшее понижение активности кремнекислоты приводит к образованию флогопита.

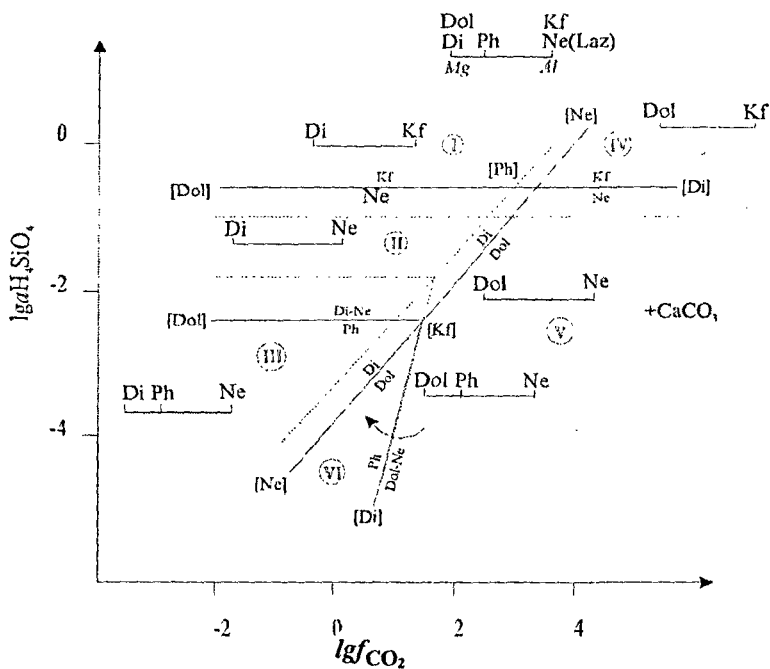


Рис.3. Зависимость минеральных парагенезисов метасоматических образований стадии лазуритизации от активности кремнекислоты и фугитивности углекислоты при температурах  $650^{\circ}\text{C}$  (сплошная линия) и  $550^{\circ}\text{C}$  (пунктирная линия).

Таким образом, уменьшение активности кремнекислоты в системе приводит к следующей закономерной смене парагенетических ассоциаций минералов:  $Kf+Dol \leftarrow Kf+Di \leftarrow Di+Laz \leftarrow Ph+Di$  или  $Ph+Laz \leftarrow Ph+Dol$ . Причиной подобной закономерной смены минералов является разница химических потенциалов  $(SiO_2)_{aq}$  в растворах, равновесных с минералами гранитов и доломитовых мраморов, что обуславливает диффузию  $SiO_2$  и закономерную смену ассоциаций от гранитов к мраморам.

Показано, что диопсид-лазуритовая ассоциация устойчива при значениях  $pH > 6$ , и определяется изменением активности кремнекислоты в интервале от  $10^{-0,7}$  до  $10^{-3}$ . При повышении кислотности среды диопсид-лазуритовая зона замещается флогопитом. Понижение температуры сужает поле устойчивости диопсид-лазуритовой зоны. Существование ее становится возможным в интервале активности кремнекислоты  $10^{-1}-10^{-2,5}$  и в более щелочных условиях ( $pH > 7$ ). Изменение активности других компонентов не влияет существенно на устойчивость данной зоны.

С увеличением активности натрия диопсид-полевошпатовые парагенезисы сменяются лазуриносодержащими породами. При температуре  $650^\circ C$  ассоциация диопсид+лазурит стабильна в довольно широком интервале активностей натрия и кремнекислоты. Снижение активности кремнекислоты приводит к появлению флогопита. Увеличение активности натрия расширяет поле устойчивости диопсид-лазуритовой зоны. При очень низких активностях натрия ( $< 10^{-4}$ ) диопсидированный гранит ( $Di-Kf$ ) будет замещаться флогопитом при  $a_{H_4SiO_4} \approx 10^{-1,5}$ . При температуре  $550^\circ C$  калиевый полевой шпат замещается плагиоклазом (II тип лазуриновой минерализации). На это указывают и оценки температур по двуполевошпатовому термометру. В целом, понижение температуры на  $100^\circ C$  сужает рамки существования диопсид-лазуритовой ассоциации и расширяет поле устойчивости флогопита.

Минеральные ассоциации апоскарновых метасоматитов являются трехфазовыми, что указывает на инертное поведение трех компонентов ( $Mg, Al, Si$ ). При формировании апоскарновых метасоматитов повышение  $\mu_{Na_2O}$  приводит к замещению диопсида лазурином с образованием ассоциации форстерит+диопсид+нефелин. От химического потенциала калия зависит интенсивность процесса флогопитизации. С увеличением  $\mu_{K_2O}$  парагенезисы с нефелином сменяются флогопитсодержащими ассоциациями.

Большое разнообразие минеральных парагенезисов зависит не только от внешних факторов равновесия ( $\mu_{Na_2O}-\mu_{K_2O}$ ), но и от соотношения инертных компонентов в исходной породе (иными словами, от соотно-

шения форстерита и диопсида). Состав лазуритсодержащей породы будет зависеть от соотношения данных минералов субстрате: существенно форстерит-лазуритовые ( $\pm$ диопсид) при замещении форстеритовых скарнов и диопсид-лазуритовые ( $\pm$ форстерит) при лазуритизации диопсидовых скарнов.

Лазуритовые метасоматиты первого типа формировались при температурах 600–650°C. Температуры образования второго типа лазуритовой минерализации лежат в пределах 500–600°C. При более низких температурах поле лазурит-диопсидовой ассоциации устойчиво лишь при очень высоких значениях активности натрия, что вряд ли возможно. Парагенезис диопсид+лазурит при температуре 650°C, принятой за наиболее вероятную температуру образования ранней и наиболее распространенной кубической модификации лазурита, существует при следующих параметрах системы:  $pH > 6$ ,  $a_{H_4SiO_4} = 10^{-1.5} - 10^{-2.5}$ ,  $a_{Na^+} = 10^{-2.5} - 10^{-3.5}$ . В диопсид-лазуритовых метасоматических образованиях, при температуре 550°C лазурит образуется в сильно щелочной среде при значениях  $pH > 7$  и существует в широком интервале активности кремниевой кислоты ( $10^{-1} - 10^{-2.5}$ ) и натрия ( $> 10^{-2.5}$ ). Появление в диопсид-лазуритовой ассоциации флогопита свидетельствует о понижении активностей натрия и кремния. Флогопит замещает минералы ассоциации диопсид+лазурит при повышении активности калия. С понижением температуры поле устойчивости диопсид-лазуритовой парагенетической ассоциации уменьшается, смещаясь в область более щелочных сред.

Таким образом, формирование лазуритовых метасоматитов происходит на регрессивном этапе метаморфизма при смене следующих процессов: а) внедрение магматических тел субщелочных гранитов, гранит-пегматитов, аплитов, сиенитов в карбонатную толщу магнезиальных мраморов, содержащих первично-осадочную серу, претерпевших метаморфизм в условиях гранулитовой фации; б) деформация и разлинзование вмещающих мраморов и магматитов с образованием будинаж-структур; в) биметасоматическое взаимодействие двух химически неравновесных сред, на контакте которых происходит перераспределение химических компонентов под воздействием гидротермальных растворов.

Образование лазурита в вулканогенных породах происходит в значительно отличающейся геологической обстановке. Об этом свидетельствуют как минеральные парагенезисы, так и морфология кристаллов лазурита. Однако литературные сведения о вулканогенных лазуритах настолько незначительны, что интерпретировать полученные данные достоверно не представляется возможным.

### **Публикации по теме**

*Янсон С.Ю.* Лазурититы Ляджвардаринского и Малобыстринского месторождений. Материалы семинара «Ювелирное искусство и материальная культура». С-Петербург, 1997. С.78.

*Янсон С.Ю.* Сравнительная характеристика лазурититов Ляджвардаринского и Мало-Быстринского месторождений // В сб. «Уральская минералогическая школа –98». Екатеринбург: изд. УГГГА, 1998. С.130-131.

*Янсон С.Ю.* Новые данные о лазуридах Ляджвардаринского месторождения. В сб. «Минералогические музеи». С.-Петербург: изд. СПбГУ, 1998. С.140-141.

*Янсон С.Ю., Анастасенко Г.Ф.* Морфология кристаллов лазурита. Материалы семинара «Ювелирное искусство и материальная культура». С-Петербург, 1998. С. 71-72

*Янсон С.Ю., Анастасенко Г.Ф., Нестеров А.Р.* Морфология и особенности строения поверхности кристаллов лазурита // В сб. «Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века». С.-Петербург: изд. СПбГУ, 1999. С.270-272.

*Янсон С.Ю., Анастасенко Г.Ф., Нестеров А.Р.* Лазурит из вулканогенных образований Альбанских гор // В сб. «Уральская минералогическая школа –99». Екатеринбург: изд. УГГГА, 1999. С.318-321.

*Янсон С.Ю., Анастасенко Г.Ф., Нестеров А.Р.* Морфология и особенности строения поверхности кристаллов лазурита // Вестник СПбГУ, 1999. Вып. 4. С. 68-73.