

## МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 553. 896.621.55(571.5)

### ЛАЗУРИТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ БАДАХШАНСКОГО МАССИВА

Е.М. Асочакова, С.И. Коноваленко

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

В работе рассматриваются лазуритовые породы Бадахшанского массива, который располагается на юге Средней Азии на стыке двух складчатых сооружений: Юго-Западного Памира и Восточного Гиндукуша. На примере месторождений Сары-Санг, Ляджвардара и проявления Горон описаны структурно-текстурные особенности и минеральный состав лазуритовых пород. Спектральный, рентгеноструктурный, химический анализы позволили выявить типоморфные признаки главных, второстепенных и аксессуарных минералов. Рассмотрены вопросы генезиса лазуритовой минерализации Бадахшанского массива и признаки зон лазуритизации.

**Ключевые слова:** лазурит, магнезиальные скарны, будинаж, зональность, Сары-Санг, Ляджвардара, Горон.

#### Введение

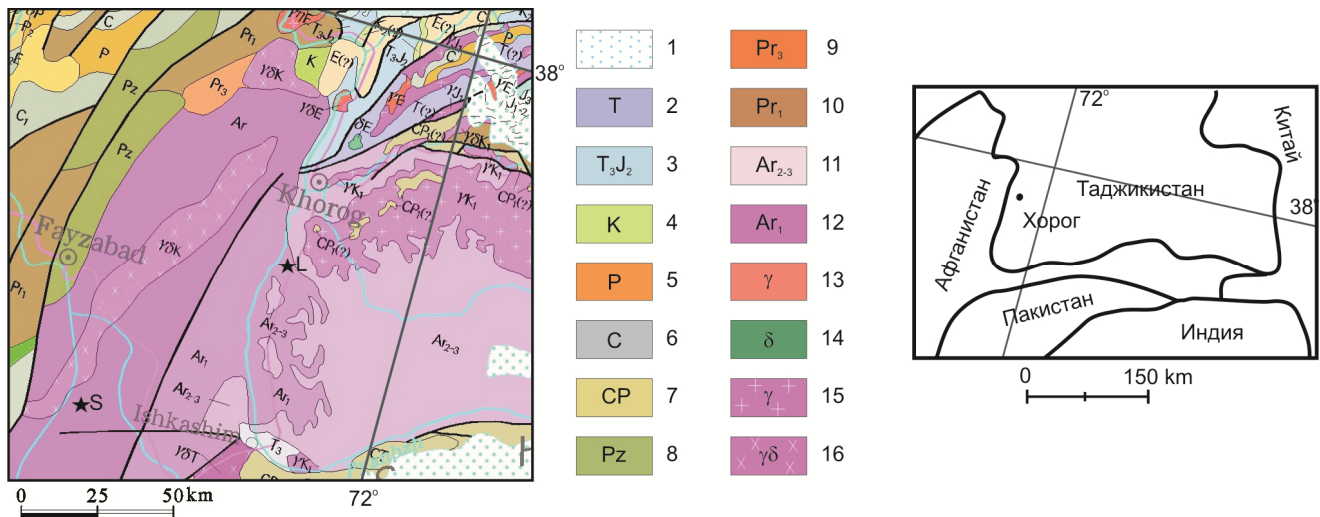
Бадахшанский район находится в пределах Юго-Западного Памира (ЮЗ Памир) и Восточного Гиндукуша – это высокогорные системы на юге Средней Азии, северо-восточная и юго-западная части которых находятся в пределах Таджикистана и Афганистана соответственно. С глубокой древности Бадахшанский район привлекал внимание как источник знаменитых самоцветов – бадахшанских лалов, лазурита. Именно бадахшанский лазурит высоко ценился на мировом рынке, его доставляли и успешно продавали в Индии, Месопотамии и в других странах с III–II в. до н.э., а отдельный отрезок Великого шелкового пути на Памире назывался лазуритовым [Литвиненко, Барнов, 2010; Абдалиева, 2016; Lo Giudice et al., 2009]. К настоящему времени в Бадахшанском районе известно два крупных месторождения лазурита – это Сары-Санг в Афганистане и Ляджвардара в Таджикистане. Аналоги этих месторождений известны в России, Чили, США, Канаде, ЮАР, Индии и Мьянме [Асочакова, 2006; Литвиненко, 2012; Faryad, 1999; Coenraads, Canut De Bon, 2000]. Изучение лазуритовых пород на территории Афганистана проводилось большим коллективом геологов (Ж. Блез, Ф. Сезброн, А.Н. Майоров, М.Е. Креков, И.Я. Ефимов, А.И. Судеркин), подробно описавшим лазуритовые породы и составившим схему геологического строения месторождения Сары-Санг [Ефимов, Судеркин, 1967]. Месторождение Ляджвардара было открыто геологами Таджикско-Памирской экспедиции Г.П. Юдиным, А.В. Хабаковым, П.П. Лукницким в 1930 г. В 1934 г. С.И. Клунников и А.И. Попов подробно описали и оценили запасы лазурита в коренном залегании и в осыпях [Литвиненко, Барнов, 2010].

Изучение особенностей лазуритовой минерализации Бадахшанского массива стало возможным

благодаря наличию каменного материалов в распоряжении авторов работы. Образцы месторождения Ляджвардара были отобраны С.И. Коноваленко во время экспедиции на Памир в 1970–1980-х гг., кроме того было опробовано вновь обнаруженное проявление лазурита в среднем течении правого борта р. Горон. Образцы месторождения Сары-Санг предоставлены заведующей минералогическим музеем имени И.К. Баженова Томского государственного университета В.Л. Свешниковой.

#### Геологическое строение месторождений и проявлений

Район лазуритовых месторождений сложен породами ваханского комплекса, входящего в состав Бадахшанского срединного массива, и отделен от комплексов ЮЗ Памира серией разломов. Ваханский комплекс объединяет метаморфические породы, развитые по осадочным толщам ваханской серии, и интрузивные образования, наиболее ранние из которых выделяются в так называемый хорогский ортокомплекс [Буданов, 1993]. Территория ЮЗ Памира сложена главным образом докембрийскими метаморфическими породами. Образования осадочного чехла условно карбонового (немацдаринская свита) и палеогенового (?) возрастов (едомская свита) очень ограничены по площади и в большинстве случаев имеют тектонические контакты с породами докембрийского кристаллического основания (рис. 1). В докембрийских породах выделены образования двух разновозрастных структурно-формационных комплексов: архейские породы основания (горанская, сарысангская и шахдаринская серии, а также хорогский ортокомплекс) и нижнепротерозойские породы чехла – аличурская серия [Иванов, Сапожников, 1985; Киселев, Буданов, 1986; Индосинийский... 1992; Буданов, 1993].



**Рис. 1. Геологическая карта района лазуритовых месторождений. Вырезка из геологической карты Северной, Центральной и Восточной Азии [Atlas... 2008]**

1 – ледниковые и снежные покровы; 2 – триасовые отложения; 3 – верхнетриасовые и среднеюрские отложения; 4 – меловые отложения; 5 – пермские отложения; 6 – каменноугольные отложения; 7 – каменноугольно-пермские отложения; 8 – палеозойские отложения; 9 – верхнепротерозойские породы; 10 – нижнепротерозойские породы; 11 – средне-верхнеархейские породы; 12 – нижнеархейские породы; магматические породы; 13 – граниты палеогеновые; 14 – диориты палеогеновые; 15 – граниты мелового возраста; 16 – гранодиориты мелового возраста. Месторождения: S – Сары-Санг, L – Ляджвардара

**Fig. 1. Geological map of the area of lapis lazuli deposits. Cut from Geological map of Northern-Central-Eastern Asia and adjacent areas [Atlas... 2008]**

1 – glacier and snow cover; 2 – Triassic sediments; 3 – Upper Triassic and Middle Jurassic; 4 – Cretaceous; 5 – Permian rock; 6 – Carboniferous rock; 7 – Carboniferous-Permian rock; 8 – Paleozoic rock; 9 – Upper Proterozoic rock; 10 – Lower Proterozoic rock; 11 – Middle-Upper Archaean rock; 12 – Lower Archaean rock; Igneous rocks; 13 – Paleogene granites; 14 – Paleogene diorites 15 – Cretaceous granites; 16 – Cretaceous granodiorites. Deposits: S – Sary-Sang, L – Lyadzhvardara

*Месторождение Сары-Санг (Афганистан).* На северо-востоке Афганистана находится основная часть Бадахшанской лазуритоносной провинции, включающая уникальное месторождение Сары-Санг, а также другие проявления лазурита (Челемак, Дераво Боло, Дук, Сахи и т.д.). Большинство из них обнаружено в бассейне верхнего течения р. Кокча (крупный левый приток Пянджа). Лазуритовая минерализация зафиксирована в двух горизонтах доломито-кальцитовых мраморов свиты сахи, входящей в состав верхнеархейской метаморфической серии. Мраморы чередуются с дистен-силлиманитовыми сланцами, биотитовыми и амфиболовыми гнейсами, амфиболитами и кварцитами.

Существенную роль в строении месторождения играют как докембрийские породы – гранито-гнейсы, аплиты, пегматиты, ортоамфиболиты, так и более молодые мезозойские (юра – ранний мел) гранитоиды [Киевленко, 2000; Литвиненко, 2012].

Лазуритовая минерализация в большинстве случаев представлена измененными будинами алюмосиликатных пород концентрически-зонального строения в диопсидовых скарнах среди кальцифиров и

доломито-кальцитовых мраморов [Киселев, Буданов, 1986; Киевленко, 2000]. В центре будин наблюдаются кварцево-полевошпатовые (ортотлазовые или микроклиновые, иногда интенсивно альбитизированные) породы, сменяющиеся мелкозернистыми диопсидовыми метасоматитами с нефелином, содалитом, гаюином и лазурином. Вслед за ними следует карбонат-диопсид-лазуриновая зона, в которой диопсид замещался гаюин-лазуриновым агрегатом, иногда с афганитом и нефелином. По периферии будин развиты диопсид-форстерит-кальцитовые породы, переходные к кальцифировым. Продуктивная лазуриновая зона чаще всего имеет серповидную форму с пережимами и ответвлениями при ширине, меняющейся от нескольких сантиметров до 1 м и длиной до 5 м и более [Киевленко, 2000].

Уникальность месторождения Сары-Санг определяется очень большим размахом лазуритизации, качеством сырья и большими запасами лазуриновых пород. Лазуритоносные тела обнажены в рельефе под крутыми углами на большую глубину, что позволяет отрабатывать их штольнями на многих горизонтах [Литвиненко, 2012].

*Месторождение Ляджвардара (Таджикистан).* Лазуриновые тела месторождения наблюдаются в верхах горанской серии (аналог свиты сахи) в кальцит-доломитовых мраморах и кальцифирах мощностью от 10 до 70 м, находящиеся между пироксен-биотит-роговообманковыми и гранат-биотитовыми, биотитовыми гнейсами [Киселев, Буданов, 1986; Литвиненко, Барнов, 2010]. Лазуритоносный пласт сложен серыми и белыми массивными мелко- и среднезернистыми мраморами, местами содержащими до 35% форстерита, а также до нескольких процентов диопсида, флогопита, графита, шпинели и апатита. Характерно присутствие линзовидных прослоев биотитовых гнейсов и многочисленных будинированных даек и жил ортоамфиболитов, аплитовидных гранитов и пегматитов длиной до 10–15 м и мощностью 0,2–5 м. Вдоль пластовых трещин и по контактам с гнейсами и будинами алюмосиликатных пород развиты диопсидовые, флогопит-диопсидовые и диопсид-лазуриновые скарны [Литвиненко, Барнов, 2010].

Лазуриновые тела встречаются в виде желваков и линз длиной до 1–5 м и толщиной 0,3–1 м, представляющих собой метасоматически замещенные

будины аплитов, аплитовидных гранитов и гранит-пегматитов. Линзы и желваки имеют зональное строение: от измененных дисилицированных алюмосиликатных пород к дипсид-лазуритовым и флогопит-диопсид-кальцитовым кальцифирам с форстеритом. Для лазуриновых пород характерны тонкозернистое строение и чистая ярко-голубая окраска. По трещинам, пересекающим скарнированные будины, можно наблюдать поздний крупнозернистый темно-синий лазурит. Масштабы месторождения Ляджвардара значительны, поскольку помимо лазуритоносных осыпей в коренном залегании известно не менее 200 различных по размерам гнезд и линз с лазуритом [Киевченко, 2000; Литвиненко, Барнов, 2010].

*Проявление Горон (Таджикистан).* Проявление находится в 50 км к юго-востоку от г. Хорога в среднем течении правого борта р. Горон на высоте более 3 500 м. Район также сложен глубокометаморфизованными породами верхней части горанской серии, в составе которой широко развиты гнейсы, мигматиты, кальцит-доломитовые мраморы и лазуриновые метасоматиты (рис. 3).

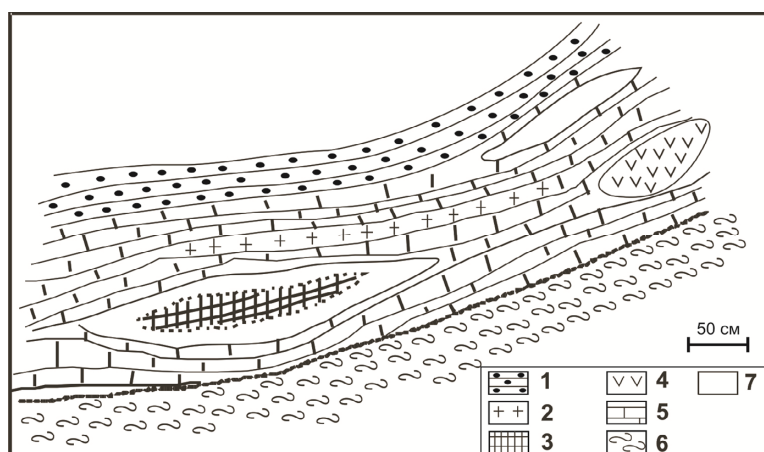


Рис. 3. Схема геологического строения участка Горон, по полевым материалам С.И. Коноваленко

1 – полевошпатовая порода с кварцевыми прожилками и микроклиновыми глазками; 2 – гнейсограниты; 3 – диопсид-лазуритовая порода; 4 – диопсидовая порода; 5 – кальцит-доломитовые мраморы; 6 – гнейсы; 7 – флогопит-кальцитовая порода

Fig. 3. Scheme of the geological structure of the Goron section, according to the field materials of S.I. Konovalenko

1 – feldspar rock with quartz veins and microcline eyes; 2 – gneiss granites; 3 – diopside-lazuritic rock; 4 – diopside rocks; 5 – calcite-dolomite marbles; 6 – gneiss; 7 – phlogopite-calcite rock

Гнейсо-граниты залегают согласно с вмещающими породами в толще кальцит-доломитовых мраморов и непостоянны по простираению. Кальцит-доломитовые мраморы подстилаются эгирин-авгитовыми гнейсами и перекрываются полевошпатовыми метасоматитами. Мелкозернистая диопсид-лазуриновая порода имеет неравномерную окраску с

зонами голубого и белого цвета, с неоднородной, пятнистой текстурой за счет кальцит-полевошпатового агрегата. Между диопсид-лазуриновыми породами с тонкой вкрапленностью пирита и кальцит-доломитовыми мраморами наблюдается лазуриновая зона с крупным флогопитом, переходящим во флогопит-кальцитовый агрегат. На проявлении от-

мечена зональность: 1) кальцит-доломитовый мрамор; 2) кальцит-флогопитовая зона, которая пересечена прожилками кальцита с кристаллами лазурита; 3) кальцит-диопсидовая зона; 4) диопсид-лазури-товая зона с плагиоклазом; 5) диопсидовая зона. Особенностью проявления является отсутствие ядра алюмосиликатных пород, которые, вероятно, были полностью замещены.

### Минералогия лазуритовых пород

*Лазурит* относится к каркасным алюмосиликатам группы содалита. Окраска лазурита связывается с наличием парамагнитных центров  $S_2^-$ ,  $S_3^-$ ,  $\{SO_3\}$ ,  $\{SSO\}$ , причем синяя – с радикалом  $S_3^-$  зеленая –  $S_2^-+S_3^-$ , желтая –  $S_2^-$ . Голубая окраска связывается с ионом  $S_2^-$ , неустойчивым в свободном состоянии и образующим полисульфид – ион  $S_4^{2-}$ . Повышение интенсивности синей окраски при прокаливании объясняется переходом сульфатной серы в сульфидную [Таусон, Сапожников, 2003; Минералы, 2003b; Gambardella et al., 2016].

Лазурит месторождения Сары-Санг имеет насыщенный синий, индиговый цвет с характерной мелко-тонкозернистой структурой (рис. 3, а).

В лазуритовых породах он находится в ассоциации с диопсидом, кальцитом, пиритом, апатитом и сфеном. Лазуритовые породы отличаются по структурному рисунку: пятнистые и полосчатые (рис. 4, а, б). В пятнистых лазуритовых породах наблюдаются агрегаты кальцит-диопсидового состава с редкими кристаллами пирита, по краям которых видны овальные зерна апатита, а в зернах диопсида – клиновидные кристаллы сфена (рис. 4, б). Полосчатые лазуритовые породы наследуют полосчатость исходных пород, которая выражается слоями лазурита различной густоты, иногда подчеркнутые послойной вкрапленностью пирита (рис. 4, б).

В образцах месторождения Ляджвардара лазурит составляет основную массу породы, иногда составляет

60 % от ее объема. Он образует плотные мелкозернистые агрегаты с диопсидом, флогопитом, карбонатами, пиритом и пирротином. Окраска лазурита меняется от бледно-голубой до индигово-синей, которая нередко изменяется в пределах одного образца. Размер зерен лазурита варьирует от 0,01 до 0,05 мм (рис. 4 с, d). Количество лазурита в диопсид-лазури-товой зоне составляет 40 % и более, достигая в локальных обособлениях размером 4×6 см 90 %. Цвет у таких обособлений ярко-синий и фиолетово-синий.

Диопсид-лазури-товая порода проявления Горон имеет неравномерную окраску с зонами голубого и белого цвета (рис. 3, б). Структура мелкозернистая, текстура – неоднородная, пятнистая, обусловленная наличием кальцит-полевошпатового агрегата в основной диопсид-лазури-товой массе. Замещение диопсида и полевого шпата лазуритом придает породе коррозионную микроструктуру (рис. 4, е), симплектитовая – за счет тесного срастания диопсида и лазурита. Характерна примесь единичных зерен кварца и мусковита. Цвет лазурита меняется от голубого до васильково-синего. Кроме того, отмечен лазурит зеленоватого оттенка и необычного нежно-фиолетового цвета, образуя определенную полосчатую окраску. Наблюдаются округлые кристаллы лазурита в кальцитовой прожилке (рис. 4, f).

Лазурит до сих пор является интересным для исследователей в структурно-минералогическом плане. У него установлены четыре структурные разновидности: кубическая, ромбическая, триклинная и моноклинная [Иванов, Сапожников, 1985; Минералы, 2003b; Канева и др., 2010; Таусон и др., 2010; Coenraads et al., 2000; Hassan, 2000]. Выделенные структурные разновидности близки по химическому составу, неразличимы макроскопически и по парагенетическим ассоциациям, но отличаются оптическими свойствами, размерами и симметрией элементарной ячейки.

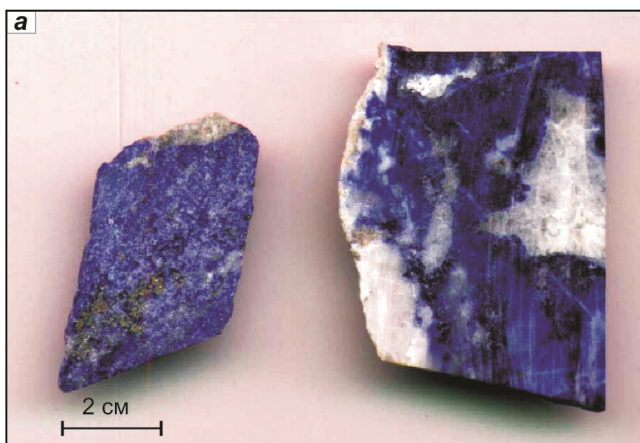
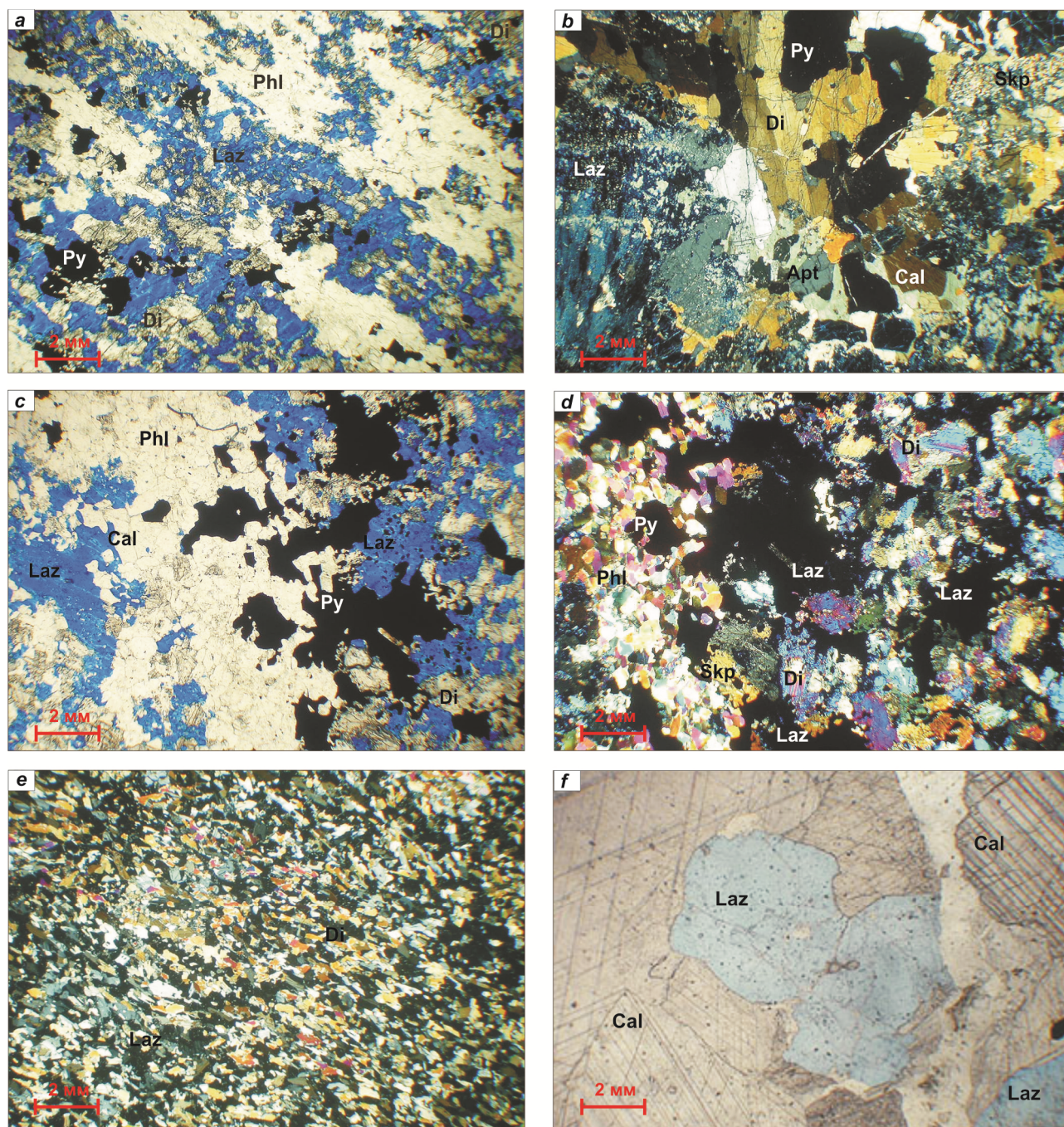


Рис. 3. Лазуритовые породы Бадахшана. а – месторождение Сары-Санг; б – проявление Горон

Fig. 3. Lazurite rocks of Badakhshan. а – Sary-Sang; б – Goron





**Рис. 4. Структурно-текстурные разновидности лазуритовых пород Бадахшанского массива**

Месторождение Сары-Санг: *a* – полосчатая текстура; николи II; *b* – пятнистая текстура, николи X; Месторождение Ляджвардара: *c*, *d* – структура замещения диопсида лазуритом; *c* – николи II; *d* – николи X. Проявление Горон: *e* – Симплектитовая структура диопсид-лазуритовых пород, николи X; *f* – Идиоморфная структура лазурита в кальцитовом прожилке, николи II. Apt – апатит, Di – диопсид, Cal – кальцит, Laz – лазурит, Phl – флогопит, Py – пирит, Skp – скаполит.

**Fig. 4. Structural and textural varieties of the lazuritic rocks of the Badakhshan massif**

The Sary-Sang deposit: *a* – Striped texture; Nicoli II; *b* – Spotted texture; Nicoli X. The Lyadzhvardara deposit: *c*, *d* – The structure of diopside substitution by lazurite; *c* – Nicoli II; *d* – Nicoli X. The occurrence of Goron: *e* – Symplectite structure of diopside-lazurite rocks; *f* – The idiomorphic structure of lazurite in the calcite veinlet, Nicoli II. Apt – apatite, Di – diopside, Cal – calcite, Laz – lazurite, Phl – phlogopite, Py – pyrite, Skp – scapolite.

По данным рентгеноструктурного анализа, лазурит месторождения Ляджвардара и проявления Горон представлен кубической разностью (табл. 1).

По химическому составу лазурит месторождения Ляджвардара кроме видообразующих катионов Na и

Ca содержит Fe, Mg, Sr, Mn (табл. 2), в позиции Ca отмечается недостаток катионов. Соотношение Si : Al изменяется в 1 : 1,04–1,08.

Количество Fe, Mg в лазуритах месторождения Сары-Санг в 3 раза больше.

Таблица 1

## Результаты рентгеноструктурного анализа лазурита

Table 1

## XRD powder data of lazurite

Кубический лазурит [Минералы, 2003b]			Ляджвардара		Горон							
(a <sub>выч</sub> = 9,08)			90–26 (a <sub>выч</sub> = 9,06)		G-6A (a <sub>выч</sub> = 9,04)		G-8(2) (a <sub>выч</sub> = 9,05)		G-8 (a <sub>выч</sub> = 9,02)		G-8(1) (a <sub>выч</sub> = 9,04)	
<i>hkl</i>	<i>I</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>d/n</i>	<i>I</i>	<i>d/n</i>
110	40	6,42	5	6,43	5	6,37	4	6,38	4	6,38	4	6,37
200	17	4,54	2	4,56	2	4,50	3	4,50	3	4,52	3	4,51
14/5.1.4/5	15	4,10	6	4,11	6	4,02	5	4,18	5	4,01	5	–
2.4/5.4/5	10	3,96	2	3,87	2	3,89	2	3,84	2	–	2	–
211	100	3,71	10	3,72	10	3,69	10	3,69	10	3,69	10	3,69
2.11/5.11/5	14	3,45	2	3,36	2	3,47	–	3,62	2	3,34	2	3,36
21/5.11/5.1	10	3,35	3	3,15	3	3,4	–	3,35	3	3,22	3	2,89
			–	–	1	2,96	–	–	1	2,97		
310	40	2,87	6	2,86	6	2,86	8	2,87	8	2,86	1	2,90
222	80	2,62	8	2,62	3	2,61	7	2,61	7	2,61	7	2,61
			1	2,49	1	2,47	2	2,57	2	2,48	2	2,48
21/5.21/5.2	10	2,45	3	2,42	1	2,41	2	2,42	2	2,42	2	2,42
			1	2,36	–	–	4	2,33	–	–	–	–
400	20	2,27	4	2,27	3	2,25	5	2,3	6	2,21	–	–
330,411	50	2,14	7	2,14	2	2,13	6	2,13	–	–	6	2,13
41/5.1.4/5	7	2,07	1	2,08	1	2,07	2	2,06	2	2,09	2	2,08
			2	1,98	–	–	–	–	–	–	–	–
332	6	1,94	2	1,93	6	1,94	–	–	–	–	2	1,90

Примечание: 1. G-6A – темно-синий лазурит из краевой зоны с крупным флогопитом; G-8 – темно-синий лазурит из лазурит-полевошпатовой зоны; G-8(1) – зеленый лазурит из лазурит-полевошпатовой зоны; G-8(2) – фиолетовый лазурит из лазурит-полевошпатовой зоны; № 90-26 – темно-синие кристаллы лазурита из кальцитовых гнезд перекристаллизации. 2. Условия съемки: ДРОН-3, Cu – излучение; 3. “—” – линия не обнаружена; 4. hkl – символы граней, I – интенсивность, d/n – межплоскостное расстояние, a<sub>выч</sub> – параметр элементарной ячейки в Å. Анализы выполнены в лаборатории НИЛ ЭПМ кафедры минералогии и геохимии, аналитик Т.С. Небера

Note: 1. G-6A – the dark blue lazurite from the marginal zone with a large phlogopite; G-8 – the dark blue lazurite from the feldspar zone; G-8 (1) – the green lazurite from the lazurite-feldspar zone; G-8 (2) – the purple lazurite from the lazurite-feldspar zone; № 90-26 – the dark blue crystals of lazurite from calcite nests of recrystallization. 2. Survey conditions: DRON-3, Cu radiation; 3. “—” – the line is not detected; 4. hkl – the symbols of the faces, I – the intensity, d/n – the interplanar distance, and the primary – the parameter of the unit cell. The analyzes were performed in the laboratory of the Research Laboratory of Experimental Mineralogy, Department of Mineralogy and Geochemistry, Tomsk State University, analyst T.S. Nebera

Также в афганских лазуритах отмечаются повышенное содержание хлора, наличие воды и сульфидной серы. Общее соотношение Si : Al  $\approx$  1 : 1,01, среди катионов кроме Na, Ca, преобладают K, Mg, Fe. Анионная часть минерала состоит главным образом из сульфатной, сульфидной серы (табл. 2).

Геохимическая характеристика лазуритовых месторождений впервые проведена в работе [Иванов, Сапожников, 1985], где установлены типоморфные элементы, такие как Sr, Ba, В и Ве. Отмечаются закономерные вариации содержания Sr в кальцификах в зависимости от степени скарнирования исходных мраморов, увеличиваются последовательно от диопсид-лазуритовых пород (100 г/т), лазуритового кальцифира (270 г/т) до диопсид-скаполитовых пород (480 г/т) [Иванов, Сапожников, 1985].

В породах стадии лазуритообразования на месторождениях Памира количество Ba варьирует от 36 до 2 450 г/т, максимальные содержания характерны для флогопитовых пород [Иванов, Сапожников, 1985]. Среди лазуритовых пород повышенные

содержания Ba характерны для лазурит-кальцит-калишпатовых пород (900 г/т) [Иванов, Сапожников, 1985]. Считается, что метасоматиты наследуют химизм замещаемых пород в отношении этого элемента. Ве, подобно Ba, не привносится, а его содержание в диопсид-лазуритовых породах в зависимости от типа замещаемой породы колеблется от 2 до 30 г/т [Иванов, Сапожников, 1985].

Авторами проведены исследования геохимических особенностей поведения элементов-примесей в лазурите, флогопите и клиногумите (табл. 3), т.е. в главном, второстепенном и акцессорном минералах. Результаты количественного спектрального анализа лазурита показали, что лазурит месторождения Ляджвардара по сравнению с лазуритами проявления Горон имеет повышенные концентрации: сидерофильных – Mn до 320 г/т, Fe до 2 700 г/т, V до 20 г/т, Cr до 59 г/т; литофильных – Sn до 300 г/т, Ba до 310 г/т, Zr до 58 г/т и пониженные концентрации халькофильных – Pb до 280 г/т, Cu до 41 г/т и Ti до 140 г/т (табл. 3).



Таблица 2

## Химический состав лазурита, мас. %

Table 2

## Chemical composition of lazurite, wt. %

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	33,01	33,36	31,34	33,12	33,57	33,70	32,65	33,00
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	0,03	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,87	26,89	26,27	27,23	27,24	27,40	27,45	27,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	—	0,27	—	—	—	—	—
MgO	0,45	—	2,47	—	—	0,40	—	—
MnO	0,06	—	—	—	—	—	—	—
CaO	5,65	6,55	7,97	7,00	7,01	7,43	7,39	8,13
SrO	0,19	—	—	—	—	0,13	—	0,07
BaO	—	—	—	—	—	0,01	—	0,12
Na <sub>2</sub> O	13,74	18,10	15,75	18,47	18,05	16,14	17,61	13,34
K <sub>2</sub> O	0,68	0,33	1,02	—	0,03	0,95	0,02	0,54
SO <sub>3</sub>	11,39	13,16	8,71	11,69	13,14	10,05	16,25	12,23
S	—	—	1,84	1,36	0,22	2,66	—	—
F	—	—	—	—	—	0,05	—	0,04
Cl	0,2	0,30	0,78	0,35	0,35	0,24	0,12	0,19
CO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	1,29	—	0,98
H <sub>2</sub> O	—	—	3,87	1,52	0,58	1,09	—	—
Сумма	91,27	98,69	100,29	100,74	100,19	101,57	101,49	96,24

Примечание: 1 – месторождение Ляджвардара, материалы С.И. Коноваленко; 2 – месторождение Ляджвардара [Минералы, 2003b]; 3 – месторождение Сары-Санг [Минералы, 2003b]; 4, 5 – Южное Прибайкалье [Таусон, Сапожников, 2003]; 6 – Южное Прибайкалье [Канева и др., 2010]; 7 – Южное Прибайкалье [Минералы, 2003b]; 8 – Итальянские горы (штат Колорадо, США) [Минералы, 2003b].

Note: 1 – the Lyadzhvardara deposit, materials of S.I. Konovalenko; 2 – the Lyadzhvardara deposit [Minerals, 2003b]; 3 – the Sary-Sang deposit [Minerals, 2003b]; 4, 5 – the Southern Baikal region [Tauson, Sapozhnikov, 2003]; 6 – the Southern Baikal region [Kaneva et al., 2010]; 7 – the Southern Baikal region [Minerals, 2003b]; 8 – the Italian mountains (Colorado, USA) [Minerals, 2003b].

Формулы лазурита посчитаны на 20 катионов, количество OH-группы – расчетное, по балансу заряда.

1.  $(\text{Na}_{5,03}\text{K}_{0,16})_{5,18}(\text{Ca}_{1,14}\text{Mg}_{0,13}\text{Sr}_{0,02}\text{Mn}_{0,01})_{1,3}[\text{Al}_{5,76}\text{Si}_{6,24}\text{O}_{24}](\text{SO}_3)_{1,61}\text{Cl}_{0,06}$
2.  $(\text{Na}_{6,52}\text{K}_{0,08})_{6,6}(\text{Ca}_{1,31}\text{Si}_{0,10})_{1,41}[\text{Al}_{5,89}\text{Si}_{6,11}\text{O}_{24}]\{(\text{SO}_3)_{1,84}\text{Cl}_{0,09}(\text{OH})_{0,626}\}$
3.  $(\text{Na}_{5,73}\text{K}_{0,24})_{5,97}(\text{Ca}_{1,60}\text{Mg}_{0,69}\text{Fe}_{0,04})_{2,33}[\text{Al}_{5,81}\text{Si}_{5,89}\text{O}_{24}]\{(\text{SO}_3)_{1,23}\text{S}_{0,65}\text{Cl}_{0,25}(\text{OH})_{0,34}\}$
4.  $\text{Na}_{6,59}\text{Ca}_{1,38}[\text{Al}_{5,91}\text{Si}_{6,11}\text{O}_{24}]\{(\text{SO}_3)_{1,62}\text{S}_{0,47}\text{Cl}_{0,11}(\text{OH})_{0,54}\}$
5.  $(\text{Na}_{6,46}\text{K}_{0,01})_{6,47}(\text{Ca}_{1,39}\text{Si}_{0,11})_{1,50}[\text{Al}_{5,93}\text{Si}_{6,04}\text{O}_{24}]\{(\text{SO}_3)_{1,82}\text{S}_{0,08}\text{Cl}_{0,11}(\text{OH})_{0,01}\}$
6.  $(\text{Na}_{5,83}\text{K}_{0,23})_{6,06}(\text{Ca}_{1,49}\text{Si}_{0,29}\text{Al}_{0,03}\text{Mg}_{0,11}\text{Sr}_{0,01})_{1,93}[\text{Al}_{6,00}\text{Si}_{6,00}\text{O}_{24}]\{(\text{SO}_3)_{1,41}\text{S}_{0,93}(\text{CO}_2)_{0,33}\text{Cl}_{0,08}\text{F}_{0,03}(\text{OH})_{0,01}\}$
7.  $\text{Na}_{6,37}(\text{Ca}_{1,48}\text{Si}_{0,10}\text{Al}_{0,04})_{1,62}[\text{Al}_{6,00}\text{Si}_{6,00}\text{O}_{24}]\{(\text{SO}_3)_{2,28}\text{Cl}_{0,04}(\text{OH})_{0,05}\}$
8.  $(\text{Na}_{5,12}\text{K}_{0,14})_{5,26}(\text{Ca}_{1,73}\text{Si}_{0,55}\text{Al}_{0,45})_{2,76}[\text{Al}_{6,00}\text{Si}_{6,00}\text{O}_{24}]\{(\text{SO}_3)_{1,82}(\text{CO}_2)_{0,27}\text{Cl}_{0,06}\text{F}_{0,03}(\text{OH})_{2,03}\}$

В лазуритах месторождения Ляджвардара среднее содержание Be – 3,5 г/т, такие концентрации характерны для магматических пород и мигматизированных гнейсов.

Наблюдается резкое различие по составу элементов-примесей в лазуритах месторождения Ляджвардара и проявления Горон. Содержание Ba в лазуритах Горона достигает 240 г/т, что характерно для флогопитовых кальцифиров. Содержание Pb в отдельных пробах лазуритах Горона достигает 570 г/т, что, вероятно, связано с присутствием галенита в лазуритовых породах. Концентрация Fe в пробе из кальцит-диопсидовой породы также высока и равна 0,5%, что связано с наличием большого количества пирита. Максимальное количество Cu – 300 г/т и Ti – 900 г/т, характерно для кальцит-флогопит-лазуритовых пород проявления Горон, в то же время их минимальные концентрации 4 и 20 г/т соответственно – для лазуритов месторождения Ляджвардара.

Диопсид является крайним членом изоморфного ряда  $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$  –  $\text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$  (диопсид-геденбергит). В образцах пород месторождения Ляджвардара и проявления Горон он чаще представлен зернистыми агрегатами белого цвета (лейкодиопсид), иногда бывает окрашен в различные, в основном бледные оттенки грязно-зеленого или серого цвета.

В изученных образцах месторождения Ляджвардара диопсид с лазуритом и кальцитом образует плотные мелкозернистые агрегаты (рис. 3, а–е). Содержание его меняется от 25–60 % объема лазуритовой породы. Также он встретился в виде единичных зерен в кальцит-флогопитовых породах и кальцифиров. Диопсид образует вкрапленность в пегматит-аплите и венцы вокруг кварцевых обособлений, иногда диопсид вместе с кальцитом выполняет трещинки, которые секут зерна калиевого полевого шпата. Большое количество диопсида (до 70 %) характерно

для диопсид-лазуритовых пород, в составе которых могут быть кальцит, апатит, пирит. Структуры диопсид-лазуритовых пород с преобладающим диопсидом большей частью реакционные и отличаются

крайней неоднородностью. Диопсид присутствует в виде микрозернистых сростаниях с лазуридом. Относительно крупные кристаллы редки (до 1 мм). Макроскопически белый, в шлифах бесцветен.

Таблица 3

Содержание элементов-примесей в минералах лазуритовых пород, г/т

Table 3

Content of impurity elements in the minerals from lazuritic rocks, ppm

М-р	Элемент	Pb	Cu	Sn	Mn	Ba	Be	Sr	V	Cr	Ni	Zr	Ti	Ga	Fe
	П.О.	3	3	3	3	200	2	200	5	10	3	30	3	3	3
<i>Лазуридом</i>															
Ляджвардара	3	215	41	300	320	—	2	200	8	13	4	40	38	21	2 700
	4	280	4	55	180	220	3	—	9	22	3	37	22	23	1 900
	5	38	—	200	290	310	7	—	20	59	5	55	34	15	2 200
	8	21	—	200	180	210	3	—	11	21	—	70	100	14	1 400
	7	13	3	13	130	230	5	—	14	—	—	33	140	11	700
	9	30	31	300	150	280	3	—	19	13	3	58	96	14	1 900
	3*	14	3	25	26	—	2	200	5	21	5	—	70	24	300
Горон	G-6A	380	150	—	21	—	2	200	8	10	3	—	90	9	400
	G-8	260	120	3	31	240	6	210	10	11	—	30	170	11	280
	G-8*	370	230	4	25	200	3	—	20	13	—	32	140	15	550
	G-8**	310	170	2	27	200	7	200	10	11	—	30	240	11	700
	G-5A	570	300	4	550	—	2	—	55	14	3	45	900	9	5 000
Прибайкалье	17529	14	3	220	120	524	2	30	6	27	—	42	100	9	500
	15861	10	4	41	250	2380	2	30	11	46	3	42	60	10	900
	3448	19	—	28	50	410	2	—	—	35	3	41	12	9	260
<i>Флогопит</i>															
Ляджвардара	9	8	48	30	100	2330	—	—	40	41	6	30	220	25	1 000
	6	10	5	30	45	1630	—	—	63	19	3	—	330	31	500
	90-20	20	6	14	160	600	—	—	90	40	3	53	470	13	3 600
Горон	G-6	16	5	4	500	280	—	—	56	13	3	56	260	12	700
	G-5A	20	6	2	500	240	—	—	25	10	4	45	420	10	550
	G-6A	—	6	3	360	250	—	—	36	10	—	36	270	12	1 000
<i>Клиногумит</i>															
Ляджв.	K-1	35	37	—	62	—	—	—	16	—	10	41	3000	3	1 600
	K-2	20	88	3	450	—	—	—	10	10	—	46	630	3	4 300

Примечание. 1. П.О. – предел обнаружения – минимальная концентрация, которую можно обнаружить данным методом; 2. “—” – элемент не обнаружен. 3. *Лазуридом*: \* – бледно-зеленого цвета; \*\* – фиолетового цвета; остальные – синего цвета. *Флогопит*, месторождение Ляджвардара: 9 – темно-серого цвета; 6 – серебристо-белого цвета; 90-20 – светло-коричневого цвета; проявление Горон: все – серого цвета. *Клиногумит*, месторождение Ляджвардара: K-1 – клиногумит из мрамора со шпинелью, K-2 – из кварцсодержащего мрамора. Анализы выполнены в лаборатории НИЛ ЭПМ кафедры минералогии и геохимии, аналитик Е.Д. Агапова

Note. 1. П.О. – The detection limit is the minimum concentration that can be detected by this method; 2. “—” – item not found. 3. *Lazurite*: \* – pale green; \*\* – purple; the other – blue. *Phlogopite*, the Lyadzhvardara deposit: 9 – dark gray; 6 – silver white; 90-20 – light brown color; the occurrence of Horon: all – gray. *Clinohumite*, the Lyadzhvardara deposit: K-1 – from marble with spinel, K-2 – from quartz-containing marble. The analyzes were performed in the laboratory of the Research Laboratory of Experimental Mineralogy, Department of Mineralogy and Geochemistry, Tomsk State University, analyst E.D. Agapova

На проявлении Горон в пределах лазуридонной жилы распространены породы, почти на 90 % состоящие из лейкодиопсида. Макроскопически образец представляет собой породу со скрытокристаллической структурой, с плотной и массивной текстурой. Минерал был определен в проходящем свете по оптическим свойствам. Микроструктура породы гранобластовая. Минеральный состав представлен диопсидом – 90 %, плагиоклаз, вторичные и рудные минералы – 10 %.

Диопсид образует изометричные зерна размером менее 0,2 мм. Зерна минерала сильно трещиноваты, большая часть зерен включает тонкораспыленный рудный материал в виде округлых обособлений. По сравнению с лазуридом, диопсид всегда идиоморфен.

По взаимоотношению диопсида с другими минералами можно выделить следующие структуры:



пойкилобластовая, включения зерен диопсида в крупных зернах плагиоклаза; симплектитовая, мелкозернистые срастания диопсида с бесцветным лазуритом, зерна диопсида и лазурита не индивидуализированы и не превышают 0,01 мм (рис. 3, с, е); кор-

розионная структура замещения диопсида лазуритом (рис. 3, d).

По химическому составу диопсид месторождения Ляджвардара отличается от диопсида Прибайкалья меньшим содержанием  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  (табл. 4).

Таблица 4

Химический состав диопсида и флогопита, мас. %

Table 4

Chemical composition of diopside and phlogopite, wt. %

Компонент	Диопсид					Флогопит			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
$\text{SiO}_2$	50,77	54,62	55,68	54,93	54,06	40,63	40,27	40,03	41,95
$\text{TiO}_2$	0,15	0,2	0,28	0,23	0,05	0,4	0,4	0,75	0,4
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,96	2,09	2,48	2,94	3,13	13,8	13,2	14,69	13,9
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,1	0,02	0,21	0,21	0,88	—	0,28	0,59	0,17
$\text{FeO}$	4,63	1,08	1,08	1,26	0,36	1,47	1,96	3,1	—
$\text{CaO}$	16,87	23,26	21,49	22,14	23,26	0,11	1,65	0,44	0,5
$\text{MgO}$	16,8	18,14	18,65	16,93	17,74	25,43	25,41	23,35	27,2
$\text{MnO}$	0,75	0,04	0,02	0,04	0,02	0,01	0,09	0,04	0,02
$\text{Na}_2\text{O}$	0,61	0,1	0,31	0,66	0,35	0,33	0,31	0,36	0,78
$\text{K}_2\text{O}$	0,28	0,08	0,14	0,1	0,06	7,84	9,77	12,04	10,35
$\text{Rb}_2\text{O}$	—	—	—	—	—	0,145	0,14	0,13	—
$\text{CsO}$	—	—	—	—	—	0,025	0,01	0,015	—
$\text{Li}_2\text{O}$	—	—	—	—	—	0,011	0,031	0,028	—
F	—	—	—	—	—	1,87	1,24	—	3,65
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,02	0,04	0,18	0,03	0,04	—	—	—	—
LOI	7,42	0,6	0,64	0,14	0,36	4,45	4,54	3,4	2,1
Сумма	99,36	100,27	101,16	99,61	100,31	96,521	99,301	98,963	101,02

*Примечание.* Диопсид, 1 – месторождение Ляджвардара, серо-зеленый диопсид из метасоматитов на контакте доломитовых мраморов и пегматитов кварц-полевошпатового состава; 2–5 – Южное Прибайкалье, диопсид из диопсид-лазуриновых пород [Иванов, Сапожников, 1985]; Флогопит, месторождение Ляджвардара: 1 – светлый (кофейный) флогопит из занорышей в аплит-пегматите; 2 – зеленовато-коричневый флогопит из эндоконтакта лежащего блока (диопсидит); 3 – флогопит экзоконтакта; 4 – флогопит из аполазуриновых пород.

*Note.* Diopside, 1 – the Lyadzhvardara deposit, gray-green diopside of metasomatites on the contact of dolomite marbles and pegmatites of quartz-feldspar composition; 2–5 – the Southern Baikal region, from diopside-lazuritic rocks [Ivanov, Sapozhnikov, 1985]; Phlogopite, the Lyadzhvardara deposit: 1 – light (coffee) phlogopite from nest in aplite-pegmatite; 2 – greenish-brown phlogopite from the endocontact of the recumbent block (diopside); 3 – from exocontact zone; 4 – phlogopite from apolazuritic rocks.

Кристаллохимические формулы диопсида рассчитаны на 4 катиона:

- 1)  $(\text{Ca}_{0,71}\text{Na}_{0,05}\text{K}_{0,01}\text{Mg}_{0,99}\text{Fe}^{2+}_{0,15}\text{Mn}_{0,03}\text{Al}_{0,04}\text{Si}_{0,01})_{1,22}[\text{Si}_2\text{O}_6]$
- 2)  $(\text{Ca}_{0,9}\text{Na}_{0,01}\text{Mg}_{0,98}\text{Fe}^{2+}_{0,03}\text{Al}_{0,07}\text{Ti}_{0,01})_{1,09}[(\text{Si}_{1,98}\text{Al}_{0,02})_2\text{O}_6]$
- 3)  $(\text{Ca}_{0,83}\text{Na}_{0,02}\text{K}_{0,01}\text{Mg}_{1,00}\text{Fe}^{2+}_{0,03}\text{Fe}^{3+}_{0,01}\text{Al}_{0,1}\text{Ti}_{0,01})_{1,14}[\text{Si}_2\text{O}_6]$
- 4)  $(\text{Ca}_{0,86}\text{Na}_{0,05}\text{Mg}_{0,92}\text{Fe}^{2+}_{0,04}\text{Fe}^{3+}_{0,01}\text{Ti}_{0,01}\text{Al}_{0,12})_{1,08}[(\text{Si}_{1,99}\text{Al}_{0,01})_2\text{O}_6]$
- 5)  $(\text{Ca}_{0,9}\text{Na}_{0,02}\text{Mg}_{0,95}\text{Fe}^{2+}_{0,01}\text{Fe}^{3+}_{0,02}\text{Al}_{0,08})_{1,06}[(\text{Si}_{1,95}\text{Al}_{0,05})_2\text{O}_6]$

Кристаллохимические формулы рассчитаны на 8 катионов:

- 1)  $(\text{K}_{0,75}\text{Na}_{0,05}\text{Rb}_{0,01})_{0,81}(\text{Mg}_{2,83}\text{Al}_{0,21}\text{Fe}_{0,09}\text{Si}_{0,04}\text{Ca}_{0,01})_{3,18}[\text{Al}_{1,00}\text{Si}_{3,00}\text{O}_{10}] \text{F}_{0,44}(\text{OH})_2$
- 2)  $(\text{K}_{0,90}\text{Na}_{0,04}\text{Rb}_{0,01}\text{Li}_{0,01})_{0,96}(\text{Mg}_{2,73}\text{Ca}_{0,13}\text{Fe}^{2+}_{0,12}\text{Fe}^{3+}_{0,02}\text{Ti}_{0,02}\text{Mn}_{0,01})_{3,03}[\text{Al}_{1,09}\text{Si}_{2,91}\text{O}_{10}] \text{F}_{0,28}(\text{OH})_{1,8}$
- 3)  $(\text{K}_{1,09}\text{Na}_{0,05}\text{Rb}_{0,01}\text{Li}_{0,01})_{1,16}(\text{Mg}_{2,48}\text{Fe}^{2+}_{0,18}\text{Al}_{0,08}\text{Ca}_{0,03}\text{Ti}_{0,04}\text{Fe}^{3+}_{0,03})_{2,84}[\text{Al}_{1,15}\text{Si}_{2,85}\text{O}_{10}] (\text{OH})_{1,9}$
- 4)  $(\text{K}_{0,92}\text{Na}_{0,11})_{1,03}(\text{Mg}_{2,83}\text{Al}_{0,08}\text{Ca}_{0,04}\text{Ti}_{0,02}\text{Fe}^{3+}_{0,01})_{2,98}[\text{Al}_{1,06}\text{Si}_{2,93}\text{O}_{10}] \text{F}_{0,66}(\text{OH})_{1,9}$

Среди видообразующих катионов преобладают Ca и Mg, меньшую роль играют Na и  $\text{Fe}^{2+}$ , в незначительных количествах присутствуют K,  $\text{Fe}^{3+}$ , Mn, Ti. Прибайкальские диопсиды по содержанию компонентов резко отличаются от диопсида месторождения Ляджвардара и включают ощутимые количества  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Среди изоморфных примесей диопсид из месторождения Ляджвардара содержит Na и K, замещающие Ca, и  $\text{Fe}^{2+}$  и Mn – Mg.

*Флогопит.* В образцах из месторождения Ляджвардара и проявления Горон флогопит образует листовато-пластинчатые агрегаты и кристаллы в виде гнезд в диопсид-лазуриновых породах размером до 4 см. Облик кристаллов в гнездах таблитчатый, короткопризматический. Кристаллы грубо образованы с явно выраженной параллельной штриховкой на боковых гранях. Большие скопления флогопита характерны для флогопитовой зоны лазури-

тизированных будин, где он ассоциирует с кальцитом и диопсидом. В направлении от диопсид-лазуритовой зоны к кальцит-флогопитовой происходит последовательное разрастание кальцит-флогопитовой породы за счет диопсид-лазуритовой. В направлении к периферии гнезда наблюдаются постепенное уменьшение количества диопсида и лазурита и увеличение количества и размеров зерен кальцита и флогопита. В итоге происходит образование крупнокристаллической кальцит-флогопитовой зоны, формирующей оторочку вокруг гнезда. Содержание минерала меняется от 25 до 70 %. Мощность флогопитовой зоны варьирует от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров и обычно не очень велика. Цвет слюды в этих породах серебристый и темно-серый. В шлифах флогопит очень похож на мусковит – бесцветен, имеет неправильные и вытянутые зерна, часто изогнутые и деформированные. В отличие от мусковита, отсутствует псевдоабсорбция. Границы зерен четкие, но неровные, тесно ассоциируют с диопсидом, плагиоклазом, кальцитом (см. рис. 4, *a, c, d*). Иногда во флогопите отмечаются пойкилитовые включения диопсида.

Химический анализ флогопита приведен в табл. 4. Соотношение Si : Al изменяется в пределах 2,5–3,00 : 1. Среди катионов преобладают K, Na, меньшую роль играют Li, Rb и Cs. Среди двух валентных катионов – Mg, Fe и Ca, незначительно – Mn, Ti. Анионная часть минерала состоит главным образом из фтора и гидроксильной группы.

Спектральный анализ флогопита из лазуриновых пород месторождения Ляджвардара показал повышенные содержания Ba до 2 330 г/т, Fe до 3 600 г/т, Ti до 470 г/т (см. табл. 3). Пробы флогопита отличаются друг от друга по цвету: светло-коричневый флогопит содержит Fe – 3 600 г/т, темно-серый флогопит (№ 9) – 1 000 г/т, серебристо-белый флогопит (обр. № 6) – 500 г/т, а по содержанию Ba обнаруживается обратная закономерность. В наиболее окрашенном флогопите содержится Ba 600 г/т. Высокие конценрации характерны для сиенитовых пород [Иванов, Сапожников, 1985], которые, вероятно, и являлись субстратом для образования флогопитовых метасоматитов. Флогопит из кварцсодержащего мрамора с клиногумитом и апатитом имеет невысокое количество Ba (590 г/т), что характерно для кварц-кальцитовых мраморов [Иванов, Сапожников, 1985]. В отношении других примесей, флогопит содержит сравнительно высокую концентрацию следующих элементов: Cu – 48 г/т, V – 90 г/т, Cr – 41 г/т, Ga – 30 г/т (табл. 3). Для флогопита же проявления Горон характерно повышенное содержание следующих элементов: Mn до 500 г/т, Zr до 56 г/т, Ti до 42 г/т (табл. 3). Содержание Ba в среднем 260 г/т, что характерно для диопсид-лазуриновых пород [Ива-

нов, Сапожников, 1985], следовательно, эти флогопиты из диопсид-лазуриновых пород. Концентрация Fe изменяется от 550 до 1 000 г/т, причем проба с большим содержанием не содержит меньшее количество Ba.

*Кальцит* в образцах проявления Горон и месторождения Ляджвардара образует мелко- и крупнозернистые агрегаты. Он слагает форстеритовые кальцифиты, кальцит-доломитовые мраморы, встречается в диопсид-полевошпатовых и лазуриновых породах (рис. 4, *c, d*). Кристаллы очень редки, наиболее часто встречаются средне- и крупнозернистые агрегаты. В кальцит-доломитовых мраморах зерна доломита более идиобластичны, чем кальцита, который имеет неправильную форму. Размер зерен варьирует от 0,2 до 1 мм. В лазуриносодержащих породах отмечаются две генерации кальцита. Первая генерация кальцита представлена тонкозернистыми агрегатами в диопсид-лазуриновых породах (рис. 4, *b–d*), которая распространена крайне неравномерно. В отдельных случаях количество кальцита может достигать 20 % объема породы. Вторая генерация кальцита образует прожилки с кристаллами лазурита (рис. 4, *f*) и связана с перекристаллизацией диопсид-лазуриновой породы.

Из второстепенных и акцессорных минералов в лазуриновых породах встречаются: форстерит, клиногумит, скаполит, полевые шпаты, апатит, пирит и галенит.

*Форстерит* отмечен в кальцифитах и мраморах в ассоциации с кальцитом, клиногумитом, диопсидом, шпинелью и флогопитом. Форстеритовые кальцифиты – белые плотные мелко- или среднезернистые породы, иногда сахаровидные из-за большого количества форстерита. Текстура массивная. Форстерит имеет субизометричную форму, сильно трещиноват и образует пойкилобласты в агрегате кальцита. Отмечаются реакционные взаимоотношения форстерита и лазурита и развитие последнего по контакту зерен.

*Клиногумит* в виде вкрапленности встречается в образцах месторождения Ляджвардара и проявления Горон. Наиболее богаты им мраморы и кальцифиты. Для него характерны зернистые выделения и агрегаты, редко кристаллы. Цвет обычно желтый, желтовато-оранжевый, блеск стеклянный, прозрачен, просвечивает. В образцах минерал образует вкрапления и гнездообразные скопления зерен. Размер зерен 0,2–0,4 см. На спектральный анализ были отобраны пробы клиногумита из мраморов, находящиеся среди пород не несущие лазуриновую минерализацию и содержащие шпинель, и мраморов, связанных с образованием лазурита с месторождения Ляджвардара (см. табл. 3). Анализируемые пробы клиногумита существенно отличаются по содержанию элементов-примесей. Так, клиногумит из мрамора со шпинелью отличается высоким содержани-

ем: Pb – 35 г/т, V – 16 г/т, Ti – 300 г/т. Для клиногумита из месторождения Ляджвардара характерны высокие концентрации других элементов: Cu – 88 г/т, Mn – 450 г/т, Zn – 40 г/т, Zr – 46 г/т, Fe – 4 300 г/т.

**Скаполит.** Минералы группы скаполита ряда мариалит  $3\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] \cdot \text{NaCl}$  – мейонит  $3\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8] \cdot \text{CaCO}_3$  являются типоморфными минералами лазуритовых месторождений, либо кристаллизуются раньше лазурита, либо являются его фациальным аналогом [Faryad, 2002]. Состав скаполитов зависит от состава исходной породы. Наиболее кислые разновидности обнаружены на контактах с гранитами и не встречались на контактах с известково-щелочными сиенитами [Иванов, Сапожников, 1985]. Он определен в диопсид-лазуритовых породах проявления Горон и месторождения Ляджвардара, где образует неправильные зерна (размер зерен 0,1–0,3 мм), иногда удлинённые и часто изъеденные кальцитом и флогопитом (рис. 4, b–d).

**Полевые шпаты.** В лазуритовых месторождениях полевые шпаты представлены микроклином и плагиоклазами. Микроклин слагают главным образом аплиты, составляющие центральные части (ядра) лазуритосодержащих метасоматических тел. В метасоматических лазуритосодержащих породах плагиоклазы сильно изменены, часто в них отмечаются зерна диопсида, флогопита, границы таких зерен нечеткие. Отмечаются пойкилитовые включения диопсида в зернах альбита. В отдельных зернах альбита и калиевого полевого шпата наблюдается замещение его лазуритом с образованием неровных, зазубренных краев. В диопсид-лазуритовых породах полевые шпаты вместе с кальцитом слагают гнезда размером до 3 см, характерно замещение его лазуритом.

**Апатит** – характерный минерал диопсид-лазуритовых пород, который может присутствовать в нескольких генерациях. Он может заимствоваться из исходных алюмосиликатных пород, кристаллизоваться сингенетично лазуриту в виде хорошо оформленных кристаллов, но основная масса апатита связана с флогопитизацией диопсид-лазуритовых пород [Янсон, Пономарева, 2001].

В лазуритовых породах часто встречаются **сульфиды**. Наиболее распространен **пирит** (рис. 3, 4), который встречен во всех месторождениях и проявлении. В образцах месторождения Сары-Санг пирит образует послойную вкрапленность, чередуясь с лазуритом, кальцитом, флогопитом, что формирует полосчатую текстуру лазуритовых пород (рис. 4, a, b). Породы с пятнистой текстурой содержат пирит в виде мелкой вкрапленности. Насыщенность окраски лазурита усиливается, что объясняется повышенным содержанием ион-радикалов  $\text{SO}_4^-$  и  $\text{S}^{3-}$  [Таусон, Сапожников, 2003]. Другие сульфиды, встречающиеся на месторождениях, – галенит, пирротин, молибденит.

## Генезис лазуритовых пород

Лазурит является одним из редких природных образований и концентрируется в немногих месторождениях, два крупнейших из них связаны с Бадахшанским массивом (Сары-Санг и Ляджвардара). Бадахшанский массив является областью региональной гранитизации глубокометаморфизованных докембрийских толщ, где лазурит возникал в процессе формирования разнообразных постмагматических пород магнезиально-скарновой формации [Юргенсон, Сухарев, 1984; Индосинийский... 1992; Буданов, 1993; Faryad, 1999, 2002]. Промышленные месторождения лазурита чаще связаны с контактово-метасоматическими образованиями магнезиальных скарнов. К этой группе относятся и месторождения Южного Прибайкалья [Иванов, Сапожников, 1985; Киевленко, 2000; Канева и др., 2010; Таусон и др., 2010] и проявления на Восточном Саяне [Секерин и др., 1997; Минералы, 2003a, b]. Лазуритовая минерализация также отмечена для известковых скарнов, что характерно для месторождения в Республике Чили, которая наряду с Афганистаном является крупным поставщиком лазурита на мировой рынок [Coenraads, Canut De Bon, 2000]. Два месторождения лазуритоносных пород – Главное и Северное, залегающих в докембрийских мраморах, известны в архипелаге Баффинова Земля, Канада [Киевленко, 2000]. В США лазуритоносные породы встречаются в Итальянских горах (штат Колорадо) в зоне контакта кварцевых диоритов и кварцевых монцонитов с карбонатными породами, в окрестностях Лос-Анджелеса, горах Сан-Габриэль (рудник Бигорн, штат Калифорния) [Киевленко, 2000].

Относительно генезиса большинство авторов поддерживают гипотезу Д.С. Коржинского, рассмотревшего образование лазурита с позиций теории биметасоматоза и установившего, что лазурит образовался по алюмосиликатным породам преимущественно гранитоидного состава при их биметасоматическом взаимодействии с вмещающими магнезиальными мраморами [Коржинский, 1993]. Особенностью лазуритоносных мраморов является некоторая обогащенность первично-осадочной серой, которая может содержаться в различных формах: сульфидной – в виде примеси пирита, галенита и молибденита, а также сероводородной – в карбонатах. Кроме того, наблюдается и в элементарной форме, которая имеет явно вторичное происхождение – в результате окисления сероводорода в поверхностных условиях [Виноградов, Лицарев, 1972; Киселев, Буданов, 1986; Литвиненко, 2004].

Наряду с карбонатными породами не менее важным фактором лазуритовых месторождений является наличие в этих породах будинированных тел алюмосиликатных образований разного состава –

амфиболитов, биотитовых и графитовых гнейсов, сиенитов, гранитов, гранит-пегматитов и аплитов. Именно эти породы являются субстратом, по которому развивается лазуритовая минерализация. Высокая степень деформации и будинажа не только алюмосиликатных пород, но и самих мраморов приводит к формированию наиболее благоприятных условий для биметасоматоза [Янсон, Пономарева, 2001; Faryad, 2002]. Процесс скарнирования наиболее интенсивно происходит в межбужинных пространствах, а лазуритсодержащие скарны формируются преимущественно по мелким бужинам и их обломкам (размером не более 0,5–1,0 м), в то время как крупные бужины замещаются преимущественно диопсидовыми и скаполит-диопсидовыми скарнами [Воробьев, 1983; Иванов, Сапожников, 1985; Литвиненко, 2004].

По данным [Коржинский, 1993; Янсон, Пономарева, 2001; Александров, Сенин, 2006; Faryad, 2002; Giuliani et al., 2018], образование лазуритовых метасоматитов главным образом происходит на регрессивном этапе метаморфизма, что приводит к удалению летучих компонентов (Cl, CO<sub>2</sub>, S) из эвапоритовых толщ при высоком химическом потенциале калия и натрия и инертном поведении алюминия и магния.

Таким образом, лазуритизированные зоны могут иметь большую протяженность и приурочены к метаморфизованным доломитовым мраморам (на месторождении Ляджвардара они имеют протяженность до 350 м, на Сары-Санг – 400–500 м). Учитывая распространенную зональность тел на месторождении Ляджвардара и проявлении Горон, на которых к зоне диопсидизированного гранит-пегматита прилегает зона диопсид-лазуритовой породы, это также указывает на условия весьма высокой щелочности растворов (лазурит замещает калиевый полевой шпат, альбит). Максимальная температура, по данным [Faryad, 2002], составляет 750°C и снижается до 500–650°C, образование кубического лазурита – интервал сужается до 550–650°C [Янсон, Пономарева, 2001]. Температура формирования флогопитоносных метасоматитов лежит в интервале 500–600°C, появление которого в диопсид-лазуритовой ассоциации свидетельствует о

понижении активностей натрия и кремния [Янсон, Пономарева, 2001].

### Заключение

Месторождения лазурита Бадахшанского массива имеют схожее геологическое строение, но характеризуются рядом минералого-геохимических особенностей, которые влияют на масштабы минерализации и качество лазуритового сырья. Минералы лазуритовых пород, в состав которых входит собственно сам лазурит, а также диопсид, флогопит, клиногумит и другие, наследуют химизм замещаемых пород, что отображается в их составе. Так, концентрация типоморфных элементов-примесей (Ba, Be, Sr, Ti, Mn, Fe, Zr, Pb) в минералах месторождения Лядждара и проявления Горон фиксирует разную степень метаморфических и метасоматических преобразований будинированных тел алюмосиликатных пород. Кроме того, немаловажную роль имеет разная степень дислоцированности и трещиноватости пород. Например, на месторождении Ляджвардара лазуритовая минерализация наблюдается вблизи ядерной части антиклинали и осложняющей ее опрокинутой изоклинали, а на месторождении Сары-Санг линейные тела лазуритизированных будин прослеживаются вдоль тектонически ослабленных зон.

Таким образом, основными поисковыми критериями и признаками зон с лазуритовой минерализацией в регионе являются:

- 1) приуроченность к докембрийским сложнодислоцированным толщам магнезиальных мраморов, метаморфизованные в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций;
- 2) обогащенность мраморов первично-осадочной серой;
- 3) наличие в мраморах тел алюмосиликатных магматических пород умереннокислого и кислого составов, а также будинированных жил аплитов и пегматитов;
- 4) присутствие щелочных минералов в подстилающих метаморфических и будинах магматических пород;
- 5) характер трещиноватости и интенсивность метасоматических процессов.

### ЛИТЕРАТУРА

- Абдалиева Г.К. Памирские кыргызы на Великом шелковом пути // Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 9. С. 205–207.
- Александров С.М., Сенин В.Г. Генезис и состав лазурита в магнезиальных скарнах // Геохимия. 2006. № 10. С. 1053–1067.
- Асочакова Е.М. Минералогия лазуритовых месторождений Бадахшанского массива // Геммология : материалы второй науч. конф. Томск : ТЦНТИ, 2006. С. 15–20.
- Буданов В.И. Эндогенные формации Памира. Душанбе : Дониш, 1993. 300 с.
- Виноградов В.И., Лицарев М.А. Изотопный состав серы и некоторые особенности образования лазурита // Геохимия и минералогия серы. М. : Наука, 1972. С. 267–282.
- Воробьев Е.И. О генезисе лазурита // Минералогия и генезис цветных камней Восточной Сибири. 1983. С. 62–68.
- Ефимов И.Я., Судеркин А.И. Месторождения ляпис-лазури Сары-Санг в Северном Афганистане // Вестник АН КазССР. 1967. № 8 (268). С. 64–66.
- Иванов В.Г., Сапожников А.Н. Лазуриты СССР. Новосибирск : Наука, 1985. 173 с.



- Индосинийский** магматизм и геодинамика Южного Памира / А.Г. Владимиров, М.М. Малых, В.И. Дронов и др. ; науч. ред. Г.В. Поляков. Новосибирск, 1992. 228 с.
- Канева Е.В., Черепанов Д.И., Суворова Л.Ф., Сапожников А.Н., Левицкий В.И.** Ромбический лазурит Тултуйского месторождения (Прибайкалье) // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139, № 4. С. 95–101.
- Киевленко Е.Я.** Геология самоцветов. М. : Земля. Ассоциация ЭКОСТ, 2000. 582 с.
- Киселев В.И., Буданов В.И.** Месторождения докембрийской магнезильно-скарновой формации Юго-Западного Памира. Душанбе : Дониш, 1986. 221 с.
- Коржинский Д.С.** Петрология скарновых месторождений // Избранные труды / отв. ред. В.А. Жариков. М. : Наука, 1993. 286 с.
- Литвиненко А.К.** Нуристан-южнопамирская провинция докембрийских самоцветов // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46, № 4. С. 305–312.
- Литвиненко А.К.** Эндогенные месторождения драгоценных камней Афганистана // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2012. № 4. С. 31–36.
- Литвиненко А.К., Барнов Н.Г.** История памирских самоцветов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2010. № 4. С. 70–74.
- Минералы:** Справ. Т. 5 : Каркасные силикаты. Вып. 1 : Силикаты с разорванными каркасами, полевые шпаты / гл. ред. Г.Б. Бокий, Б.Е. Боруцкий ; отв. ред. Н.Н. Мозгова, М.Н. Соколова. М., 2003а. 583 с.
- Минералы:** Справ. Т. 5 : Каркасные силикаты. Вып. 2 : Фельдшпатоиды / гл. ред. Г.Б. Бокий, Б.Е. Боруцкий ; отв. ред. Н.Н. Мозгова, М.Н. Соколова. М., 2003б. 379 с.
- Секерин А.П., Меньшагин Ю.В., Резницкий Л.З.** Первая находка лазурита в Восточном Саяне // Доклады Академии наук. 1997. Т. 355, № 4. С. 509–513.
- Таусон В.Л., Сапожников А.Н.** О природе окраски лазурита // Записки ВМО. 2003. № 5. С. 102–107.
- Таусон В.Л., Сапожников А.Н., Акимов В.В., Липко С.В., Шинкарева С.Н., Лустенберг Э.Е.** Модулированный кубический лазурит из Прибайкалья как структура, перешедшая в состояние вынужденного равновесия // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433, № 2. С. 231–236.
- Юргенсон Г.А., Сухарев Б.П.** Условия локализации и минеральная зональность лазуриносных тел Бадахшана // Записки РМО. 1984. Ч. 113, вып. 4. С. 498–505.
- Янсон С.Ю., Пономарева Н.И.** Физико-химические условия формирования лазуриновых метасоматитов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. 2001. № 3. С. 68–71.
- Atlas of geological maps of Northern-Central-Eastern Asia and adjacent areas 1 : 2 500 000** / ed. by S.Z. Daukeev, B.C. Kim, Li Tingdong, O.V. Petrov, O. Tomurtogoo. Geological Publishing House, 2008.
- Coenraads R.R., Canut De Bon C.** Lapis lazuli from the Coquimbo Region, Chile // Gems and Gemology. 2000. V. 36, is. 1. P. 28–41.
- Faryad S.W.** Metamorphic evolution of the Precambrian South Badakhshan block, based on mineral reactions in metapelites and metabasites associated with whiteschists from Sare Sang (western Hindu Kush, Afghanistan) // Precambrian Research. 1999. V. 98, is. 3–4. P. 223–241.
- Faryad S.W.** Metamorphic conditions and fluid compositions of scapolite-bearing rocks from the Lapis Lazuli deposit at Sare Sang, Afghanistan // Journal of Petrology. 2002. V. 43, is. 4. P. 725–747.
- Gambardella A.A., Schmidt Patterson C.M., Webb S.M., Walton M.S.** Sulfur K-edge XANES of lazurite: Toward determining the provenance of lapis lazuli // Microchemical Journal. 2016. V. 125. P. 299–307.
- Giuliani G., Dubessy J., Ohnenstetter D., Banks D., Branquet Y., Feneyrol J., Fallick A.E., Martelat J.-E.** The role of evaporites in the formation of gems during metamorphism of carbonate platforms: a review // Mineralium Deposita. 2018. V. 53, is. 1. P. 1–20.
- Hassan I.** Transmission electron microscopy and differential thermal studies of lazurite polymorphs // American Mineralogist. 2000. V. 85, is. 10. P. 1383–1389.
- Lo Giudice, A., Re A., Calusi S., Giuntini L., Massi M., Olivero P., Pratesi G., Albonico M., Conz E.** Multitechnique characterization of lapis lazuli for provenance study // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2009. V. 395, is. 7. P. 2211–2217.

#### Авторы:

**Асочакова Евгения Михайловна**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра минералогии и геохимии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: ev.asochakova@gmail.com

**Коноваленко Сергей Иванович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра минералогии и геохимии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

Е.М. Asochakova, **S.I. Konovalenko**

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

# LAZURITE MINERALIZATION OF THE BADAKHSHAN MASSIF

Lazurite rocks of the Badakhshan massif, which is located in the south of Central Asia at the junction of two folded structures of the Southwestern Pamir and East Hindu Kush, are considered. On the example of the Sary-Sang, Lyadzhvardara and Goron occurrence, structural-textural features and the mineral composition of the main, secondary and accessory minerals of lazurite rocks are described. The main studies performed are spectral, X-ray structural, chemical analyzes, allowing to reveal their typomorphic features.

The formation of lazuritic metasomatites mainly occurs at the regressive stage of metamorphism, which leads to the removal of volatile components (Cl, CO<sub>2</sub>, S) from evaporite strata with high chemical potential of potassium and sodium and the inert behavior of aluminum and magnesium. The lazurite deposits of the Badakhshan massif have a similar geological structure, but are characterized by a number of mineralogical and geochemical features that affect the scale of the deposits and the quality of lazurite raw materials. Minerals of lazuritic rocks (lapzurite, diopside, phlogopite, clinohumite) often inherit the chemistry of the rocks being replaced, which is reflected in their chemical composition. The concentration of typomorphic impurity elements (Ba, Be, Sr, Ti, Mn, Fe, Zr, Pb) in the minerals of the Lyadzhvardara deposit and Horon occurrences shows different degrees of metamorphic and metasomatic transformations of the buminised bodies of aluminosilicate rocks. In addition, an important role has a different degree of dislocation and fracturing of rocks. For example, in the Lyadzhvardara field, lazurite mineralization is observed near the nuclear part of the anticline and the isocline that complicates its upturned isocline, and the Sary-Sang deposit linear bodies of lazuritized boudins are traced along tectonically weakened zones.

Thus, the main search criteria and signs of zones with lazurite mineralization in the region are: 1) confined to the Precambrian complex of magnesian marbles, metamorphosed under the conditions of the amphibolite and granulite facies; 2) the enrichment of marbles with primary sedimentary sulfur; 3) the presence in the marbles of the bodies of aluminosilicate igneous rocks of moderately acidic and acidic compositions, as well as boudinated veins of aplites and pegmatites; 4) the presence of alkaline minerals in the underlying metamorphic and Boudins of igneous rocks; 5) the nature of fracturing and the intensity of metasomatic processes.

**Keywords:** lazurite, magnesian skarn, budinage, zonality, Sary-Sang, Lyadzhvardara, Goron

## References

- Abdaliyeva G.K. *Pamirskiye kyrgyzy na velikom shelkovom puti* [Pamir Kyrgyz silk road] // Nauka, novyye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana. 2016. No 9. pp. 205–207. In Russian
- Aleksandrov S.M., Senin V.G. Genesis and composition of lazurite in magnesian skarns // *Geochemistry International*. 2006. V. 44, Iss. 10. pp. 976–988.
- Asochakova E.M. *Mineralogiya lazuritovykh mestorozhdeniy Badakhshanskogo massiva* [Mineralogy of the Lazurite deposits of the Badakhshan Massif] / *Gemmologiya Materialy vtoroy nauchnoy konferentsii*. Tomsk: TTSNTI, 2006. pp. 15–20. In Russian
- Budanov V.I. *Endogennoy formatsii Pamira* [Endogenous formation of the Pamir.]. Dushanbe: Donish, 1993, 300 p. In Russian
- Vinogradov V.I., Litsarev M.A. *Izotopnyy sostav sery i nekotoryye osobennosti obrazovaniya lazurita* [The isotopic composition of sulfur and some features of the formation of lapis lazuli]. v kn.: *Geokhimiya i mineralogiya sery*. Moscow : Nauka, 1972, pp. 267–282. In Russian
- Vorob'yev E.I. *O genezise lazurita* [On the genesis of lapis lazuli] v kn.: «Mineralogiya i genezis tsvetnykh kamney Vostochnoy Sibiri», 1983, pp. 62–68. In Russian
- Efimov I.Ya., Suderkin A.I. *Mestorozhdeniya lyapis-lazuri Sary-Sang v Severnom Afganistane* [The lapis lazuli deposits of Sary-Sang in northern Afghanistan] // *Vest.AN Kaz SSR*. 1967. No 8 (268). pp. 64–66. In Russian
- Ivanov V.G., Sapozhnikov A.N. *Lazurity SSSR* [Lazurite USSR]. Novosibirsk : Nauka, 1985. 173 p. In Russian
- Indosiniyskiy magmatizm i geodinamika YUzhnogo Pamira* [Indo-Sinian magmatism and geodynamics of the Southern Pamir] / Vladimirov A.G., Malykh M.M., Dronov V.I. i dr. / RAN, Sib. Otd-niye, Ob'yed. In-t geologii, geofiziki i mineralogii. Nauchnyy redaktor chl.-kor. RAN G.V. Polyakov. Novosibirsk, 1992. 228 p. In Russian
- Kaneva E.V., Cherepanov D.I., Suvorova L.F., Sapozhnikov A.N., Levitsky V.I. Orthorhombic lazurite from the Tultuy deposit (Baikal region) // *Zapiski VMO*. 2010. № 4. pp. 95–101. In Russian
- Kiyevlenko E.Ya. *Geologiya samotsvetov* [Geology gems]. Moscow : Zemlya. Assotsiatsiya EKOST, 2000. 582 p. In Russian
- Kiselev V.I., Budanov V.I. *Mestorozhdeniya dokembriyskoy magnezial'no-skarnovoy formatsii Yugo-zapadnogo Pamira* [Deposits of the Precambrian magnesian-skarn formation of the Southwestern Pamir]. Dushanbe: Donish, 1986. 221 p. In Russian
- Korzhinskiy D.S. *Petrologiya skarnovykh mestorozhdeniy. Izbrannyye trudy* [Petrology of skarn deposits. Selected manuscript]. Otv. red. V.A. Zharikov. Moscow : Nauka, 1993. 286 p. In Russian
- Litvinenko A.K. Nuristan-South Pamir province of Precambrian gems // *Geology of Ore Deposits*. 2004. T. 46. № 4. pp. 263–268. In Russian
- Litvinenko A.K. *Endogennoy mestorozhdeniya dragotsennykh kamney Afganistana* [Endogenic deposits of precious stones in Afghanistan] // *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2012. № 4. pp. 31–36. In Russian
- Litvinenko A.K., Barnov N.G. *Istoriya pamirskikh samotsvetov* [History of the Pamirs gems] // *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2010. № 4. pp. 70–74. In Russian
- Minerals: Handbook. V. 5: Testosilicates. Pt. 1: Silicates with interrupted framework, feldspar minerals / Editor-in Chiefs: G.B. Bokiy, B.Ye. Borutzky; Responsible editorts: N.N. Mozgova, M.N. Sokolova. 2003a. 583 p. In Russian
- Minerals: Handbook. V. 5: Testosilicates. Pt. 2: Feldspathoids / Editor-in Chiefs: G.B. Bokiy, B.Ye. Borutzky; Responsible editorts: N.N. Mozgova, M.N. Sokolova. 2003b. 379 p. In Russian
- Sekirin A.P., Men'shagin YU.V., Reznitskiy L.Z. *Pervaya nakhodka lazurita v Vostochnom Sayane* [The first finding of lazurite in the Eastern Sayan] // *Doklady Earth Sciences*. 1997. V. 355, No 4. pp. 509–513. In Russian

- Tauson V. L., Sapozhnikov A.N. *Priroda okraski lazuritov* [On the nature of lazurite coloring] // Zapiski VMO. 2003. № 5. p. 102–107. In Russian
- Tauson V.L., Sapozhnikov A.N., Akimov V.V., Lipko S.V., Shinkareva S.N., Lustenberg E.E. Modulated cubic lazurite from the baikal region: Structure transformed to the state of forced equilibrium // Doklady Earth Sciences. 2010. T. 433, № 1. C. 931–936.
- Yurgenson G.A., Sukharev B.P. *Usloviya lokalizatsii i mineral'naya zonal'nost' lazuritovosnykh tel Badakhshana* [Localization conditions and mineral zonality of the lazuritic bodies of Badakhshan] // Zapiski RMO. 1984. P. 113. Vyp. 4. pp.498–505. In Russian
- Yanson S.Yu., Ponomareva N.I. *Fiziko-khimicheskiye usloviya formirovaniya lazuritovykh metasomatitov* [Physico-chemical conditions of the formation of lazurite metasomatites] // Vestn. S.-Peterburg. un-ta. Ser. 7. 2001. 3.pp. 68–71. In Russian
- Atlas of geological maps of Northern-Central-Eastern Asia and adjacent areas 1 : 2 500 000 / Ed. Daukeev S.Z., Kim B.C., Li Tingdong, Petrov O.V., Tomurtogoo O. Geological Publishing House, 2008
- Coenraads R.R., Canut De Bon C. Lapis lazuli from the Coquimbo Region, Chile // Gems and Gemolog. 2000. V. 36, Iss. 1. pp. 28–41
- Faryad S.W. Metamorphic evolution of the Precambrian South Badakhshan block, based on mineral reactions in metapelites and metabasites associated with whiteschists from Sare Sang (western Hindu Kush, Afghanistan) // Precambrian Research. 1999. V. 98, Iss. 3-4. pp. 223–241.
- Faryad S.W. Metamorphic conditions and fluid compositions of scapolite-bearing rocks from the Lapis Lazuli deposit at Sare Sang, Afghanistan // Journal of Petrology. 2002. V. 43, Iss. 4. pp. 725–747.
- Gambardella A.A., Schmidt Patterson C.M., Webb S.M., Walton M.S. Sulfur K-edge XANES of lazurite: Toward determining the provenance of lapis lazuli // Microchemical Journal. 2016. V. 125. pp. 299–307.
- Giuliani G., Dubessy J., Ohnenstetter D., Banks D., Branquet Y., Feneyrol J., Fallick A.E., Martelat J.-E. The role of evaporites in the formation of gems during metamorphism of carbonate platforms: a review // Mineralium Deposita. 2018. V. 53, Iss.1. pp. 1–20
- Hassan I. Transmission electron microscopy and differential thermal studies of lazurite polymorphs // American Mineralogist. 2000. V. 85, Iss. 10. pp. 1383–1389.
- Lo Giudice, A., Re A., Calusi S., Giuntini L., Massi M., Olivero P., Pratesi G., Albonico M., Conz E. Multitechnique characterization of lapis lazuli for provenance study // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2009. V. 395, Iss. 7. pp. 2211–2217.

**Author's:**

**Asochakova Evgeniya M.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Mineralogy and Geochemistry, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: ev.asochakova@ gmail.com

**Konovalenko Sergey Iv.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Mineralogy and Geochemistry, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.