

УДК 553.62 + 549.514.51 (73+470)

© Г.И. Крылова\*, Л.С. Скобель\*\*, А.А. Митрофанов\*\*,  
В.Г. Балакирев\*

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИ-  
МИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О КВАРЦЕ С ТОРГОВОЙ  
МАРКОЙ ИОТА (США, штат Северная Каролина).  
ВОЗМОЖНОСТИ ПОИСКА ЕГО АНАЛОГОВ В РОССИИ**

\*ВНИИСИМС, \*\*ОАО «Полярный кварц»  
(Представлена д. чл. УАГН В.Л. Поляковым)

© Krylova G.I., Skobel L.S., Mitrofanov A.A., Balakirev V.G.

**GEOLOGICAL AND MINERAL-GEOCHEMICAL DATA OF  
QUARTZ HAVING BRAND IOTA, USA, SOUTH CAROLINA.  
SCOPE FOR SEARCHING ITS ANALOGUES IN RUSSIA**

Автореферат

Отличная репутация кварца технологического типа ИОТА на мировом рынке плавочного сырья достигнута за счет высокой чистоты и стабильности его состава. Он производится корпорацией UNIMIN (США), которая перерабатывает своеобразные плагипегматиты, комплексно используя все составляющие этой породы: кварц, мусковит и полевошпат. ИОТА-кварц охарактеризован по образцам, шлифам и пластинам из коренной породы месторождения Спрус Пайн (Ю.Аппалачи), а также по крупке кварцевых концентратов, поступавших на заводы РФ. Применялись различные методы исследований кварца, в т.ч. минералого-петрографические, электронномикроскопические, термобарогеохимические, рентгеноструктурные и рентгенолюминесцентные. Установлено, что ИОТА-кварц является умеренно примесным с суммой элементов-примесей в нем 25–32 ppm, имеет высокую степень кристалличности, плотность деформационных дислокаций  $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ , параметры элементарной ячейки –  $a_0 = 4.9129 \text{ \AA}$  и  $c_0 = 5.4044 \text{ \AA}$ ,  $V = 112.967 \text{ \AA}^3$ .

Условия формирования продуктивных пород изучены на примере района Спрус Пайн. Основные черты его геологического строения характеризуются расположением в пределах пассивной континентальной окраины, широким развитием среди вмещающего субстрата пород повышенной основности с обусловленными шарьяжно-надвиговой тектоникой сложными их взаимоотношениями, метаморфизмом пород в условиях амфиболитовой фации с дистенном в качестве индекс-минерала, полиформным и полиэтапным реоморфизмом, обилием пегматитов при отсутствии грейзенов и кварцевых жил, слабым проявлением регрессивных процессов. Кварцесущими образованиями являются кварц-мусковитовые плагипегматиты (КМП) подтипа, переход-

ного к слюдяно-керамическому. Т-Р-параметры генезиса КМП в пределах 550–650°C и 5.5–6.0 (8.0 ?) кбар в условиях пониженной щелочности среды минералообразования. КМП парагенны с лейкократовыми пегматоидными мусковитовыми гранитами (габбро-гранодиорит-плагиигранитной формации).

При прогнозной оценке районов на кварцевое сырье типа ИОТА в качестве критерия предлагается учитывать совокупность нескольких геолого-петрологических факторов; в соответствии с таким критерием потенциально перспективными рассматриваются конкретные районы Беломорского складчатого пояса, Прибайкалья, Саян и др.

**Abstrakt**

Quartz IOTA has the perfect reputation at the world market of the melted raw materials because of its high purity and composition stability. It's produced by corporation UNIMIN, USA that processes the distinctive plagiopogmatites including crusts of weathering along them. All components of rocks (quartz, muscovite, feldspar, kaolin) are used in complex. IOTA is quartz characterized by samples, sections and plates from the bedrock of the deposit Sprus Pain (the South Appalachi) and by quartz concentrates grist delivered from Russia. The following methods were used: mineral and petrographic, thermobarochemical, X-ray structural, electrical and microscopic, X-ray luminescent and others. It was established that this quartz had originally impurities. - amount of the impurities' elements was 25-32 ppm - high degree of crystallinity. Density of deforming dislocations  $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , parameters of the single cell –  $a_0 = 4.9129 \text{ \AA}$  and  $c_0 = 5.4044 \text{ \AA}$ ,  $V = 112/967 \text{ \AA}^3$ .

The terms of forming the efficient rocks were analyzed at the sample of the Sprus Pain district. The main features of its geological structure are location in the range of the passive continental district; wide development among containing complexes of rock having heightened basicity with the complicated relations caused by the overthrust tectonics; the rocks' metamorphism under amphibolitic facies including disthen index-mineral; polymorphic and heterostaged rheomorphism; range of pegmatites in accordance with greisens and quartz veins, branch reduction of the regressive processes. Quartz bearing formations are quartz muscovitic plagiopogmatites (QMP) of the transitional to micaceous ceramic subtypes. Thermal and dynamic parameters of QMP genesis are in the range of 550-650°C and 5.5-6.0 (8.0 ?) kBar under conditions of the low alkaline processes of mineral forming. QMP paragens having rheomorphic leucocratic pegmatoidic muscovitic granites of the calcic and alkaline series of the gabbro-granodiorite-plagiogranite formation.

When the region perspectives are estimated, it's suggested to consider some combinations of the various geological factors. The positive criteria for quartz (IOTA type) are supposed in the range of the concrete districts at the Belomorsky folded zone, Pribaikal, Sayany etc.

**1. Введение**

Потребление промышленностью кварца имеет тенденцию постоянного роста. В таких, особенно динамично развивающихся, отраслях (как производство кристаллического крем-

ния, наплавление тиглей для получения химически чистых веществ, волоконная оптика, спецкерамика, микроэлектроника), где используются исключительно малопримесные кварцевые продукты. Соответствующий кварц классифицируется как особо чистый плавочный технологический тип. В концентратах (крупке с размерностью зерен в 0.1–0.4 мм) такого кварца лимитируются содержания элементов-примесей (ЭП) и газонасыщенность. Учитываются, как правило, количества 11–17 ведущих ЭП, сумма которых должна приближаться к  $n \cdot 10^{-4}$  ppm (%). Газосодержание в плавочных концентратах не должно превышать 50–80 ppm. При генетическом разнообразии природного кварца пригодного для плавки технических стекол сырья оказывается не так уж много [6,7,10,27,28,32]. Одним из таких является хорошо известный американский продукт – ЮТА High Purity Quartz или айота-кварц (I-Q) США. С 1997 года такой кварц, по сути, стал на мировом рынке монополистом, так как 70% потребляемых концентратов особо чистого плавочного кварца относится к этой торговой марке.

Свою заслуженную славу айота-кварц приобрел благодаря, прежде всего, совершенным схемам обогащения\*, разработанным Unimin Corporation – как принято на неё ссылаться в России – фирмой ЮНИМИН. (Методы обогащения применяются с целью освобождения кварцевого сырья от сопутствующих инородных минеральных фаз или сростков; от содержащихся как включения минералообразующих сред (ВМОС) компонентов, чаще – в виде газовой-жидких включений; частично – от структурных ЭП) В интернете [27] и в работе [32] есть сведения о технологических характеристиках концентратов, выпускаемых указанной фирмой. Однако публикаций по характеристикам сырья и условиям его локализации пока нет. Наш же интерес именно к таким аспектам. Он вызван тем, что к соответствующим природным образованиям необходимо привлечь особое внимание специалистов. Есть все основания полагать, что перспективы выявления пород, содержащих кварц типа I-Q, реальны и для России. Поэтому немаловажно иметь разносторонние данные о генезисе и свойствах айота-кварца как об эталоне высококачественного сырья.

Становление торговой марки ЮТА началось примерно с 1950 года. Тогда компания General Electric стала в Северной Ка-

ролине использовать отходы каолинового производства, получая т.н. Quintus-кварц, пригодный для производства ламп. Содержания ЭП в его сортах были  $n \cdot 10^{-3}$ – $n \cdot 10^{-2}$ %. Только в 1980 году путем специально разработанных методов очистки были получены концентраты марки I-Q. Сертификация последнего начинается с сорта “стандарт” (I<sub>ст</sub>), а с дальнейшей прецизионной очисткой достигает сорта I<sub>г</sub>. В сумме ЭП это соответствует количествам от 25–32 до 9.1–9.7 ppm. Положительным показателем качества концентратов каждого сорта является достаточная стабильность их свойств.

Объекты добычи приурочены как к коренным гранит-пегматоидным породам, так и к корам выветривания по ним. Основной потребитель главных породообразующих минералов (полевого шпата, каолина) – керамическая промышленность. Находят спрос также мусковит и кварц, извлекаемые в количествах до 20–25% каждого из них от общей массы соответствующих продуктивных образований. Ведущий современный производитель сырья комплексного значения – месторождение Спрус Пайн (Sprus Pine). Менее значимые поставки кварца дают ещё месторождения Hawkins mine, Schoolhouse mine, Brushy Greek mine, но качество кварца в них считается худшим.

Общий обзор расположения объектов района Спрус Пайн, можно найти в работах [24,32]. Координаты района: 35°52'–35°57' северной широты и 82°12'–82°02' западной долготы. Он расположен в горной системе Южных Аппалачей с высотными отметками 750–1020 м; на площади около 120 км<sup>2</sup> (14\*9 км) находится до 30 карьеров, из которых 24 – непосредственно в гранитоидах – сателлитах Спруспайновского гранитогнейсового купола [24,29]. Прочие места добычи связаны с разобщенными пологозалегающими линзообразными телами среди гнейсосланцев.

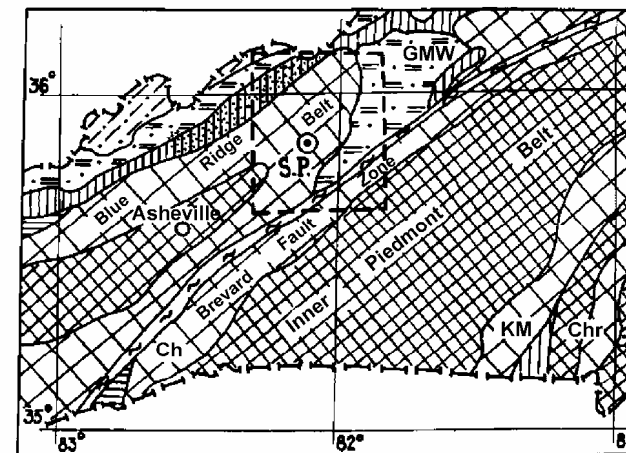
Нами в период 1992–2002 годов изучались концентраты американских продуктов, поступавших на заводы России и Германии. Две пробы в обменном порядке были предоставлены нам Л.Юнгом (США, фирма Quartz Technology). Коренные породы были отобраны Л.С.Скобелем из крупного – глубиной около 200 м – карьера месторождения Спрус Пайн. Поскольку партии концентратов I-Q поставляются потребителям без указания сведений о месторождениях, постольку имеющиеся в на-

шем распоряжении данные имеют фрагментарный характер. Но однотипность генезиса кварца сомнений не вызывает: сырье для I-Q является компонентом распространенных в северной части штата Северная Каролина пород гранитоидного состава.

Минералого-петрографические и термобарогеохимические исследования были выполнены с использованием промышленных кварцевых концентратов сортов I<sub>CT</sub> и I<sub>4</sub>, а также шлифов, пластин и монофракций из продуктивных плагиопегматитов, отобранных в карьере месторождения Спрус-Пайн. Проведены рентгеноструктурные и рентгенофазовые исследования (ВНИИСИМС, аналитики Г.Л.Ахметова и В.С.Коваленко), электронная микроскопия (ВНИИСИМС, В.Г.Балакирев), рентгенолюминесценция (ИГиГ, С.Л.Вотяков, Екатеринбург, частично – в ИГФМ, Г.В.Кузнецов, Киев), масс-спектрометрические анализы на газонасыщенность (МГУ, В.А.Крейсберг), химические анализы методом ICP AES (НЦ «Курчатовский институт», ИАЭ, Э.Г.Чудинов и А.В.Бобков), определение количества структурного алюминия - С<sub>Al</sub> – методом ЭПР (ВИМС, Л.Т.Раков), атомная абсорбция на соотношения щелочных ЭП (ВНИИСИМС, Н.И.Ненадович). Термобарогеохимические исследования айота-кварца проводили Н.И.Андрусенко (ВНИИСИМС), С.В.Соколов (ВИМС) и А.Н.Салазкин (ГЕОХИ). Изучение граната из коренных плагиопегматитов выполнено В.С.Гмырой, ИГиГ, Екатеринбург). Подготовка проб и обработка всех аналитических данных осуществлялась во ВНИИСИМСе.

## 2. Обзорные геологические сведения

Рассматриваемый район находится в северо-западной части южноаппалачского сегмента Аппалачской складчатой области. От протерозоя до позднего палеозоя там шло оформление кратонизированных блоков и складчато-надвиговых поясов, отражающих геодинамику рифтогенеза для обстановок пассивной континентальной окраины. На рисунке 1 указана часть главных составляющих его геолого-структурных подразделений; региональные карты и разрезы имеются в работах [3,12,19,23,31 и др.].



20 0 20 40 км

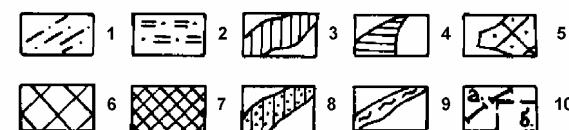


Рис.1. Схема структурных подразделений и слагающих их метаморфических комплексов в западной части штата Северная Каролина, США (по J.R.Butler, 1984)

1-3 – породы зеленосланцевой фации с зонами хлорита (1), биотита (2) и граната (3); 4-7 – породы амфиболитовой фации с зонами ставролита (4), андалузита (5), кyanита (6) и силлиманита (7); 8 – локальное развитие докембрийских гранулитов; 9 – регрессивно измененные динамометаморфизованные породы зоны Бревардского разлома. 10 – границы штата (а) и границы прилагаемой схематической геологической карты (рис.2). GMW– тектоническое «окно» Грандфаза Монтайн в составе пояса Голубых Гор; провинция Пидмонт; Chr – Шарлотта пояс и сопутствующие структурные подразделения: Ch – Чауга пояс, KM – Кингс Монтайн пояс.

Район кварценосного месторождения Спрус Пайн относится к поясу Блу Ридж (Голубых гор). С северо-запада от него размещаются более молодые породы серии Унака. К юго-востоку за милонитами и катаклазитами глубинного разлома

Бревард последовательно располагаются провинция (пояс) Пидмонт, зона Шарлотт и Каролинский сланцевый пояс, смыкающийся к Прибрежной равнине (за пределами рис.1) [3, 5, 19, 24]. Фундаментом является северо-американская плита, – кроме Прибрежной равнины, где основанием служит край африканской платформы [19]. Каждая структурная зона (или пояс) отличаются особенностями строения коры, а также характером и этапностью магматических и метаморфических явлений, обусловливающих разные типы их минерации [24, 31]. Главные эпохи (циклы) эндогенных преобразований связываются с таконской, акадской и – в значительно меньшей мере – аллеганской (позднепалеозойской) фазами складчатости [3, 5, 15, 19, 22-25, 29, 30].

Пояс Блу Ридж – это термальная антиклиналь в сложном покровно-складчатом сооружении. Он состоит из пакета надвиговых пластин разного возраста, породы которых неоднородны по литологии и степени их метаморфизма. Пояс был заложен на зрелой мощной известной как Лаврентьевская или Гренвилевская коре с возрастом в пределах 1.0–1.17 млрд. лет. Важной особенностью является, что под позднепротерозойским аллохтоном (мощности которого оцениваются в 5–16 км) обнаруживаются относительно слабее метаморфизованные автохтонные метасадочные толщи. В автохтоне фиксируется обратная прогрессивная зональность; в аллохтоне метаморфизм носил регрессивный характер. Поскольку на глубине оказались осадки, выделявшие в связи с их метаморфизмом значительные количества флюидов, в верхних частях разреза это стимулировало интенсивную метаморфогенную дифференциацию вещества и процессы реоморфизма. В юго-восточном направлении метаморфизм аллохтона и автохтона становится изофациальным, маскируя границы разновозрастных образований [23,24]. В целом же тип метаморфизма на территориях пояса можно охарактеризовать как региональный высокоградиентно-зональный, достигающий верхов амфиболитовой фации. Специфику геодинамики при утолщении континентальной коры и геологическую эволюцию региона в целом существенно определяют процессы формирования гранитоидных комплексов (куполов). В контурах рисунка 1 находятся два из них – Спруспайнский и больший Мэкон-Джексонский, расположенный в 100-120 км юго-

западнее. Последний глубже эродирован, отличается повышенной (силлиманитовой) степенью метаморфизма пород, особенностями их литологии и геохимии [12,23,25].

Магматизм пояса Блу Ридж примечателен широким развитием палеозойских гранитоидов, классификационные подразделения которых не однозначны. Ряд исследователей в качестве основных выделяют комплексы мусковитовых двуполевошпатовых гранитов или двуслюдяных лейкократовых и мусковитовых гранодиоритов [12,20,31]. Для всех соответствующих пород типичны максимум до 20 мас.% содержания калишпата (микроклин-пертита) и – по сравнению с биотитом или амфиболом – определяющая роль мусковита. Кварца в таких гранитоидах около 25%. На акцессорном уровне обычны биотит, гранат, апатит, эпидот и тулит, ортит, пирит и пирротин. Заметим, что эти же плутоны могут диагностироваться как аляскиты, мелкозернистые пегматиты, пегматоидные лейкограниты и т.п. [29]. Однако, несмотря на неоднозначность в номенклатуре, по совокупности имеющихся данных реконструируется преимущественное развитие плагиоклазовых разностей гранитоидов. Последнему соответствуют и официальные геологические материалы [24] о площадном распространении трондjemитов, в т.ч. и в окрестности месторождения Спрус Пайн. По особенностям герцинского плутонизма Южных Аппалачей (по признакам комплексов и типов пород, этапности и экстенсивности их проявления, петрохимии) регион может быть классифицирован как салическо-фемическая область т.н. саянского [20] подтипа.

Многими исследователями [12,15,22,29] отмечается, что большинство палеозойских гранитоидов Блу Риджа имеют признаки автохтонности и анатектического происхождения. Они, как правило, обогащены Al и Na при низких содержаниях Mg+Fe+Mn. Корреляция составов темноцветных минералов гранитоидов с типами вмещающих комплексов пород, их структурная конкордантность с последними при преобладании линзовидных и пластовых форм тел у магматитов и другие признаки позволяют оценивать перемещение расплавов от проявлений анатексиса как незначительное. Помимо обособленных тел гранитоидов локально распространены малые формы продуктов мигматизации. Процессы плагиомигматизации типичны для полициклически метаморфизованных комплексов аллохтона с их

близкими к грауваккам составами субстрата; для метапелитовых субстратов (обычно в зонах силлиманитовой ступени метаморфизма) характерна мигматизация калиевого профиля.

Из меланократовых магматитов в регионе распространены разнообразно измененные ортоамфиболиты. По петрохимическим данным их подразделяют [24,30,31] на метагаббро, metabазальты (в т.ч. и толеитовые), метаморфизованные в условиях амфиболитовой и эклогитовой фаций. Ультрамафиты спорадичны. Метаморфизм этих пород связывается с таконской и акадской фазами орогенеза. Периоду акадской в целом для всей Аппалачской системы соответствовал наиболее интенсивный метаморфизм. К акадской фазе приурочено весьма значительное пегматитообразование.

Среди пегматитов наиболее известны слюдоносные, выделяемые в т.н. аппалачский тип. В отличие от таких классических как мамский и беломорский этот тип более молодого – палеозойского возраста [12,17,18,29 и др.]; на крупнолистовой мусковит он не разрабатывается из-за нерентабельности. Пегматиты эксплуатируются на молотую слюду, керамическое сырье и кварц. За пределами района Спрус Пайн промышленную значимость имеют редкометалльные и другие типы пегматитов. Например, в пределах пояса Кингс-Маунтин – Sn-Li-носные (со сподуменом), в зонах Пидмонт и Шарлотт – Sn -и Be-носные (частично – с изумрудом), керамические и другие. По специфике минерогенеза многие пегматитовые и пегматоидные образования рассматриваемого района можно характеризовать как переходный или смешанный типы с общим литофильным геохимическим профилем минерализации.

### 3. Особенности геологического строения района Спрус Пайн

Наиболее принципиальные вопросы геологии иллюстрируются на обзорной карте района – рисунок 2. Эта карта составлена на основе работы [24]\*. В работе [32] есть более крупномасштабная схема, но лишь по размещению выходов гранитов и расположения мест добычи каолина в «Спруспайновском слюдоносном районе». На ней охвачена площадь размером примерно 10 км к западу и 8 км к северу от обозначенной на рисунке 2 точки S.P.; фактографии соответствует, что выхо-

ды гранитоидов составляют около 10% площади. Прочие материалы соответствуют работам [12,15,23,28,29].

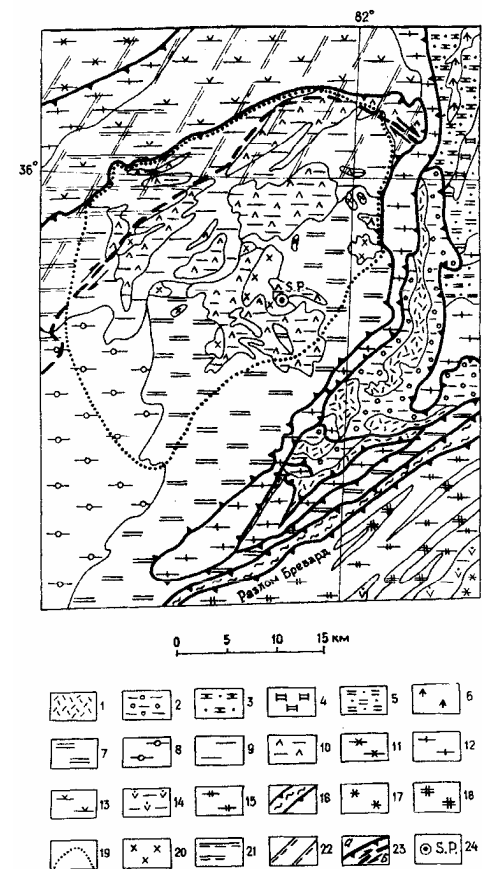


Рис.2. Обзорная геологическая карта района месторождения Spruce Pine, Северная Каролина, США (по материалам работы [24]). Условные обозначения к рис.2:

1-6 – Cm-Pt<sub>3</sub> - комплексы тектонического окна GMW в пределах пояса Голубых гор, преимущественно слабо метаморфизованные породы, в т.ч: 1 – кварцевые арениты с прослоями аспидных сланцев, метаалевролиты, метаконгломераты; 2 – полевошпатовые арениты, метаалевролиты, метаконгломераты; 3 – серицитовые конгломератовидные, местами косослоистые метааркозы, переслаивающиеся с метаалевролитами и аспидными сланцами; 4 – метаалевриты с пластами железоносных доломитовых мраморов, филлитов и метатерригенных пород (Pt<sub>3</sub>); 5 – метааркозы и метаграувакки с прослоями филлитов, аспидных сланцев, метавулканитов - фельзитов (Pt<sub>3</sub>); 6 – зеленокаменные,

## Продолжение условных обозначений к рис.2

существенно метабазальтовые породы с прослоями метаосадочных разностей (Pt<sub>3</sub>); 7-10 – Pt<sub>3</sub>-Pt<sub>2</sub> ведущие формации пояса Голубых гор, в т.ч.: 7 – формация Аллигатор (Pt<sub>3</sub>): тонкополосчатые и тонкослоистые гнейсы с включениями их массивных разновидностей, метаконгломератов, сланцев и амфиболитов; 8-10 – Ашская метаморфическая свита (Pt<sub>3</sub>), состоящая из: 8 – метаграувакковых гнейсов с прослоями слюдистых сланцев и гнейсов; 9 – двуслюдяных гнейсов, локально сульфидизированных или с прослоями сланцев и амфиболитов; 10 – ортоамфиболиты с включениями метаосадочных пород. 11-13 – несогласно залегающие формации (Pt<sub>2</sub>): 11 – диагенетически измененные гранодиоритогнейсы и милониты, 12 – биотитовые парагнейсы, ортопороды, сланцы и милониты; 13 – биотит-роговообманковые мигматиты и гнейсы с реликтами амфиболитов, биотитовых гранитогнейсов и других пород гранулитовой фации. 14-18 – Cm-Pt<sub>3</sub> – метаморфические комплексы и ортометаморфические породы провинции Пидмонт (Piedmont belt) и других сопряженных с ней зон, в т.ч.: 14 - переслаивание амфиболитов и биотитовых гнейсов с включениями роговообманковых гнейсов, слюдистых сланцев, мелких массивов метагаббро и гранитоидов; 15 – биотитовые гнейсы и сланцы неравномернозернистые, локально – с силлиманитом, линзами карбонат-силикатных пород, амфиболитов, гранитоидов; 16– динамометаморфизованные породы зоны Бревадского разлома: филлониты, сланцы, полевошпатовые метапесчаники, линзы мраморов. 17 – метаморфизованные гранитоидные образования O-Cm; 18 – кембрийские (524 млн. лет) гранитоиды переменного состава. 19-22 – ареалы концентрации или контуры площадей развития интрузивных пород: 19 - контур площади концентрации пегматитов и даек гранитов и гранодиоритов (D-S, 390-435 млн.); 20 – участки концентрации отдельных массивов кварцевых диоритов, гранодиоритов, пегматоидных мусковитовых гранитов, (в т.ч. Pz<sub>2</sub> и O<sub>1,2</sub>, – 450-500 млн.); 21 – площадь развития постметаморфических даек и силлов трондземитов с подчиненным значением гранодиоритов и тоналитов; 22 - ареалы скоплений даек и силлов метагаббро (Pt<sub>3</sub>, 734 млн.). 23 – главные тектонические нарушения - надвиги и шарьяжи (а) и сдвиги (б). 24 – месторождение Spruce Pine.

Весь рассматриваемый район относится к асимметрично построенному синклинорию Спрус Пайн в пределах пояса Голубых Гор. Сложные взаимоотношения слагающих его комплексов обусловлены чередованием во времени и пространстве крупных шарьяжей или надвигов с соответствующими им пликативными и дизъюнктивными линеаментами разных порядков. Как синклинорная структура этот район характеризуется тем, что в его центральной зоне размещены комплексы Pt<sub>3</sub> (№№ 7-10 рис.2), которые окаймляются несогласно залегающими толщами Pt<sub>2</sub> (№№ 11-13 рис.2). Образования Cm-Pt<sub>3</sub>-возраста приурочены к тектоническому окну GMW и к структурам, расположенным

юго-восточнее (за глубинным разломом Бревард, – рис.1).

Ориентируясь на приведенные в работах [3,5,12,19 и др.] разрезы, можно полагать, что глубина залегания кровли фундамента (т.н. Лаврентьевской коры) здесь оценивается в 5–7 (10?) км. Как отмечалось ранее, на нем залегает автохтон – метаморфиты по вулканогенно-карбонатно-терригенным толщам палеорифта общей мощностью до 2.5–3.0 км. Перекрывающие их метаморфиты аллохтона – это, по субстрату своему, в основном терригенные толщи пассивной континентальной окраины. Здесь неравномерно распределены амфиболиты, гнейсы, мигматиты. Мощность аллохтона достигает 4–6 км. Литологической особенностью метаморфитов района является подчиненное значение метапелитов при преобладании метаграувакк, амфиболитов, биотит-роговообманковых гнейсов и других пород основного состава. Мало в разрезах комплексов углеродистых разностей пород, почти нет кварцитов, а также пирокластических производных. Химические составы ряда распространенных пород ашской формации приводятся в работе [30], где есть и некоторые данные по парагенезисам минералов. (Более детальные сведения, очевидно, есть в United States Geological Survey Bulletin 1122-A: Brobst D.A. Geology of the Spruce Pine district, Avery, Mitchell and Yancey Counties, North Carolina, 1962.)

В разновидностях пород основного состава ведущая роль принадлежит роговой обманке. Породы в большей части без кварца. По амфиболу иногда развиваются биотит и эпидот, гранат местами замещается биотитом с хлоритом, плагиоклаз (андезин) соссюритизируется. В локально встречающихся актинолитовых сланцах бывает до 10% кварца (± пирит, кальцит, куммингтонит). В таких породах основного ряда содержится больше рудных минералов, в т.ч. пентландит в пирротине, обычны ильменит и рутил, апатит. В некоторых разностях амфиболовых пород встречается дистен [30].

В богатых слюдами метапелитовых гнейсах и сланцах обычен альмандиновый гранат (до >2%), плагиоклаз (олигоклаз, до 10-45%), нередко сульфиды (пирротин ± халькопирит), спорадически – ильменит, а при обилии мусковита в калишпатсодержащих сланцах встречается магнетит ± гематит; калишпат спорадичен. Наличие ставролита, дистена, силлиманита контро-

лируется метаморфической зональностью. В качестве аксессуаров отмечаются клиноцоизит, циркон, апатит, очень редко – хлорит. В милонитах и бластомилонитах фиксируются эпидот и сфен [15,24,25].

В разрезе Ашской формации выделяются т.н. гранофельзы – гранобластовые метаморфические породы с невыраженной ориентировкой зерен. Это – бескварцевые, существенно плагиоклазовые разности в разной мере обогащенные гранатом (с повышенным содержанием пироп-гроссуляровых миналов), дистеном и силлиманитом, иногда – с примесями амфиболов. На северо-западной периферии района Спрус Пайн имеются переработанные гранулиты и эклогиты. Непосредственно же на территории с продуктивными кварценосными образованиями основные комплексы характеризуются (№№ 9 и 10 рис.2) переслаиванием двуслюдяных или существенно мусковитовых гнейсов и сланцев с породами основного состава – ортоамфиболитами и амфиболсодержащими гнейсами. Ассоциации минералов в тех и других свидетельствуют о высокой степени метаморфизма пород и об относительно слабо проявленных регрессивных процессах. Это относится и к зоне Бревадского разлома, где филлониты, милониты и катаклазиты по разным породам сложены, большей частью, низкотемпературными минералами [24,26].

Магматогенные производные, как и во всяком полициклически развивающемся регионе, бывают разновозрастными. По данному району общие сведения есть в работах [5,26,29,31], где отмечается, что одни из древних – широко развитые здесь – ортоамфиболитовые породы были исходно базальтоидами и габброидами. Контуры развития дайкообразных тел метагабброидов (группа Vakensville с возрастом 734 млн. лет) показаны на рисунке 2. Максимальное их распространение – за пределами района Спрус Пайн, частично достигая его СЗ-фланга. Первичных минералов в них не сохраняется, так как эти породы были преобразованы уже в таконскую фазу метаморфизма, а также в последующие акадскую и (?) аллеганскую. Залегание пород в основном стратифицированное: в виде линзовидных тел и прослоев. Кислого состава ортогнейсы также являются древними образованиями (№№ 11,12,17 и 18 рис.2), участвовавшими в двух фазах тектогенеза. Ультрамафиты есть среди пород Аш-

ской формации преимущественно южнее рудника Спрус Пайн. Лишь небольшое (0.45\*0.2 км) тело метадунитов находится в 10 км от него, около Newdale. Оно залегает среди амфиболовых гнейсов, которые в контакте серпентинизированы и оталькованы, а в виде жильных ассоциаций развиваются антофиллит, магнетит, хлорит и тремолит, т.е. минералы регрессивных процессов. В этих метадунитах (с присутствием метагарцбургитов и метахромититов) отмечаются реликты оливина, ромбического пироксена и хромита. Вероятный возраст пород палеозойский; для базальтоидов и габброидов, в основном, – Pt<sub>3</sub>.

Особенности магматизма рассматриваемого района соответствует распространение постметаморфических (?) мелкозернистых трондьемитов. С ними спорадически встречаются порфиритового облика от слабо разлистованных до массивных тела тоналитового и гранодиоритового составов. Все они проявляются в виде маломощных даек и силлов. Ареал их распространения резко расширяется к юго-западу, протягиваясь согласно простиранию пояса Блу Ридж [24]. В контурах рисунка 2 они наблюдаются вдоль границы комплексов № 9 и № 13.

Известно, что трондьемиты – это петрохимически самостоятельный тип генетически конвергентных пород, довольно лейкократовых (SiO<sub>2</sub> ≥ 70–75%), с очень низкой калиевостью: K<sub>2</sub>O ≤ 1.0–1.7%, при Na<sub>2</sub>O ≥ 3–6% и CaO = 1.2–4.5%. Выделяются они в районах с широким развитием плагиогранитов, тоналитов, гранодиоритов [2,11,16,20], где часто отождествляются с лейкотоналитами. В рассматриваемом районе их можно отнести к продуктам частичного переплавления метабазальтов (и (?) эклогитов) в зонах ультраметаморфизма при низкощелочном характере петрогенеза. Распространенность трондьемитов есть признак интенсивности процессов анатексиса в пределах всего пояса.

Основным магматическим комплексом района с кварценосными породами является гранитоидный палеозойского возраста, точнее – Pz<sub>2</sub> (D), около 390 млн. лет (№ 20 рис.2). В отечественной литературе гранитоиды района Спрус Пайн неоднократно обсуждались в аспекте сравнительного анализа магматических факторов слюдоносных провинций [12,17,18 и др.]. По данным работы [24] для пояса Блу Ридж главными фациями Pz-гранитоидов являются существенно мусковитовые или двуслю-

дяные гранодиориты и кварцевые диориты. При этом для Спруспайнского гранитоидного купола отмечалось [29,31 и др.], что гранитоиды являются лейкократовыми и пегматитоподобными. На диаграмме АКФ [12 и 31]) они занимают четко изолированное поле и резко отличаются от пород зон Пидмонта, Шарлотт и других по признакам повышенной лейкократовости, глиноземистости и натровости. Наиболее крупный из выходов таких гранитоидов вблизи рудника Спрус Пайн имеет размеры всего порядка 1\*3 км. При сложной форме тела в нем имеются ксенолиты гнейсов и сланцев, чаще – в приконтактных участках. Текстура пород – от однородной до согласной сланцеватости вмещающих толщ полосчатой. Средний размер зерен ~ 1–2 см, но выделения микроклина местами (в блоково-пегматоидных обособлениях) могут достигать до 30 см. Содержания микроклина сильно варьируют (до 20%), количество олигоклаза в среднем  $\geq 40$ , кварца ~25, мусковита –15 мас.%. По многим параметрам рассматриваемые образования отвечают мусковитовым пегматоидным гранитам, близким по облику и составу разностям пегматоидных гранитов Мамской слюдоносной провинции. Генезис тех и других – реоморфический [12,17,29].

Типоморфной чертой пояса Блу Ридж является широкое развитие пегматитов: их более 1350 тел. В районе Спрус-Пайн (40\*16 км) известно более 500 тел. Они локализованы, особенно слюдоносные разности, чаще всего в пределах изограды дистена. В зонах с ортоклаз-силлиманитовыми парагенезисами установлены керамические пегматиты. Район вокруг рудника Спрус Пайн наиболее насыщен телами пегматитов; отчетливо выражена пространственная связь их с пегматоидными гранитами. Большинство жил залегает во вмещающих породах, проявляя признаки внедрения или выполнения трещин. Мощности тел могут быть от сантиметров до 100 м, при длине до 300 м; средние их размеры около 60 м в длину при мощности 3 м. Формы тел относительно простые – пластины или линзы с четкими контактами. На рисунке 2 показан контур концентрации гранитных пегматитов, среди которых выделяются группы двуполевошпатовых и кварц-мусковит-плаггиоклазовых. Возрастной диапазон у них – 450–390 (260 ?) млн. лет [15,24].

Как и в других складчатых структурах, самые ранние фазы пегматитообразования представлены плагиоразностями. Их особо большой масштаб развития в районе Спрус Пайн связан, вероятно, с длительностью этапа пегматитообразования и спецификой родоначальных повышенной основности пород, подвергавшихся реоморфизму. Продуцированные в процессе метаморфической дифференциации кварц-плаггиоклазовые высокоподвижные [12] мобилизаты способствовали формированию плагиопегматитов. При пространственной совмещенности разных типов пегматитов, двуполевошпатовые или существенно микроклиновые разновидности характеризуются приуроченностью к метапелитовым комплексам пород [12,17 и др.].

Даже если рассматривать пегматиты района Спрус Пайн в целом как слюдоносные [12,17,26,29,31 и др.], нельзя не отметить их разнотипность. Двуполевошпатовые пегматиты имеют зональность: в краевой зоне плаггиоклаз-кварц-мусковитовый состав, далее – зона пертитов и – нередко – кварцевое ядро; они бывают и крупноблокового сложения, иногда с графическими зонами. Плагиопегматиты – относительно мелкие незональные тела (присутствие кварцевых ядер не исключается). Состав плаггиоклаза в пегматитах соответствует №№ 18–20. Мусковит бывает пластинчатый «ромового» цвета и клиновидный зеленоватый. Из аксессуарных минералов присутствуют гранат, биотит, апатит, турмалин, берилл, колумбит и танталит, самарскит, некоторые урансодержащие. Общая продуктивность на листовую слюду у плагиопегматитов относительно низкая, что характерно для плагиопегматитов всех слюдоносных провинций [12,17,18].

В качестве важнейших факторов локализации пегматитов следует признать структурный и метаморфический. Относительно последнего целесообразно еще раз обратить внимание на высоконапряженный стиль тектоногенеза в данном районе. Этапы региональной складчатости сопровождалась покровно-надвиговыми дислокациями; многообразные осложнения были связаны с этапом (этапами) куполообразования. Во вмещающих породах по деталям полосчатости, линейности, микроскладчатости и другим отчетливо фиксируется не менее двух основных этапов деформаций. В целом для пород района характерно обилие складок с горизонтальными шарнирами, наличие флексурных изгибов и разных малоамплитудных пликативных элемен-



тов. Соответственно многие пегматитовые тела имеют пологое залегание и относительно простые формы тел. Обычно диагностируются признаки гнейсовидности, что для многих продуктивных пород обуславливает возможность наименования их плагиопегматитогнейсами.

Для сопряженных с таконской и акадской эпохами складчатости процессов регионального метаморфизма фиксируется возраст в диапазоне 300–450 млн. лет [15,30]: из них до 410 млн. лет – таконская фаза, с аллеганской фазой соотносят лишь некоторые гидротермальные процессы. Считается [3,20], что в конце  $S_1$  все Ю.Аппалачи испытали поднятие и после этого там наблюдались только процессы экзогенной деструкции, локально – при формировании кор выветривания [5,31].

Парагенезисы минералов метаморфических пород свидетельствуют о том, что метаморфизм достигал верхов амфиболитовой фации; более высокие ступени (гранулитовой и эклогитовой) фиксируются на северо-западе района как реликтовые. В остальном характеристики метаморфитов типичны для барроусского типа. На рисунке 1 отражено генерализованное положение зон с индекс-минералами. По опыту изучения градиентности процессов метаморфизма в сходных условиях [9,12,25 и др.] нередко фиксируются локальные температурные и барические аномалии, в частности при изменении давления до более 2 кбар на расстояниях в первые километры, что необходимо учитывать и для данного района. Из рисунков 1 и 2 следует, что развитие продуктивных на кварц пегматитов совпадает с зоной распространения дистенсодержащих парагенезисов. В пределах дистен-альмандиновой зоны часть парагенезисов является фибролит-реже ставролит-содержащими [30]. С учетом этого максимальные Т-Р-параметры метаморфизма ограничивались значениями до 610–650°C и 5,5-8 кбар. Предельные их значения, вероятно, соответствуют границе силлиманитовой зоны; наряду с силлиманитом фиксируется альмандин с содержанием пиропового минала  $\approx 12\%$  с высокой ( $f_m$  до 91) железистостью [30] как признак возможного влияния петрохимических особенностей пород субстрата.

Низкотемпературные изменения выражены слабо, но кое-где в заметных количествах отмечается мусковитизация по

дистену и микроклину, развитие хлорита, гетита, эпидота или биотита по амфиболам, сосюритизация плагиоклазов. Все такие и другие факты характеризуют специфику флюидных режимов каждого метаморфогенного цикла при фоновых значениях  $P_n \leq P_s$ , а также – редуцированность регрессивных стадий.

#### 4. Минералого-геохимические характеристики продуктивных образований

Порода рудника Спрус Пайн, из кварца которой получают крупку поставляемых концентратов I-Q, представляет собой лейкократовый пегматитогнейс, вернее – гнейсовидный плагиопегматит – неравнозернистый достаточно крупнозернистый с размерами индивидов от 0.5 до > 20 мм. Структура аллотриоморфнозернистая со следами катаклаза и бластеза (синдеформационного?). Плагиоклаз (олигоклаз № 18 и альбит № 10) составляет до 60% породы, кварц – до 18–20%, мусковит – около 20%. Прочие компоненты диагностируются как акцессорные (в суммарном количестве менее 1%), – гранат, эпидот, биотит, апатит, ортит, турмалин.

Индивиды олигоклаза преимущественно крупные (> 1.5–2.0 см). По трещинам и (или) по краям они спорадически альбитизированы, чаще – на контактах зерен плагиоклаза и кварца. Редко в плагиоклазе наблюдаются включения мусковита и эпидота. Крупные зерна плагиоклаза – с полисинтетическими двойниками, с волнистым (в т.ч. факельным) угасанием и следами блочного строения как признаков синкинематической перекристаллизации породы, что подтверждается данными электронномикроскопического изучения методом фрактографии [1,22]. На рисунке 3 представлены снимки по сколам, изломам и межзерновым поверхностям плагиоклаза, классифицированного по [1]. Детали сколов коррелируются с оптическими директориями. Нередко встречаются следы травления, в т.ч. по контурам субзерен и поверхностям дислокаций. Образование субзерен являлось результатом дробления со скольжением и с последующим подтравливанием по границам индивидов, фиксируя таким образом один из этапов деформаций породы. Примечательно, что сколы – относительно чистые (с поверхностями раз-

дела, не содержащими инородных фаз или ГЖВ), с достаточно ровными границами.

Мусковит в породе имеют тенденцию к локализации в зонках, ассоциируя с кварцем ( $\pm$  эпидот, гранат). Размеры пластинок могут достигать  $> 1.0\text{--}1.5$  см. В агрегатах мусковита местами присутствует зеленовато-бурый биотит, реликты которого сохраняются лишь в краевых частях пластинок мусковита. Отмечаются также гранат и – в форме тонких прорастаний по спайности – турмалин (?).

Особому вниманию к характеристике кварца соответствует и более детальное изучение этого минерала, в т.ч. его из пород и концентратов на электронном микроскопе. Судя по шлифам, преобладают зерна кварца среднего размера, –  $5\text{--}7$  мкм. Очертания зерен довольно прямолинейны, близки к равновесным. Выделяются также рекристаллизационно-грануляционные тонкозернистые участки, вблизи которых фиксируются разные признаки напряженности зерен (факелы угасания, слабая разблокировка) и капельного бластеза. Для всех крупных зерен кварца типично ленточное угасание; мелкие зерна, в т.ч. вросстки кварца в плагиоклазе; бывают без видимых дислокаций. Следовательно, для кварца и плагиоклаза, характерны признаки динамотермальных преобразований.

Изучение газово-жидких включений в исходном сырье по пластинам и шлифам выявило, что основная часть ГЖВ в кварцах – мелкие (до  $0.001$  мкм), приуроченные к трещинам. Формы ГЖВ есть идиоморфные и ксеноморфные. Преобладают водно-солевые двухфазовые, есть и с «бегающим» пузырьком. Объемы газа ( $V_g$ ) у  $\sim 75\%$  ГЖВ меняются в узких пределах  $10\text{--}20\%$ . На жидкие однофазовые (или с  $V_g < 5\%$ ) ГЖВ приходится до  $25\%$  от общего их числа. Они есть и по трещинам в плагиоклазе. Из-за редкости и малых размеров трудно диагностируются другие типы включений, среди которых предположительно есть кристаллофлюидные и с твердой фазой. Их можно причислить к первичным, тогда как все прочие отчетливо вторичные, являющиеся продуктами гидротермальных преобразований пород.

Кварц из плагиопегматитов имеет довольно высокую прозрачность, коэффициенты светопропускания у него от  $\sim 66$  до  $77\text{--}80\%$ , поскольку этот кварц содержит в целом очень мало и преимущественно мелких газово-жидких включений. Это

подтверждается анализом результатов вакуумной декрепитации по динамике газовой выделению в диапазоне до  $600^\circ\text{C}$ : оно весьма равномерно-низкое и даже типичное для природных кварцев повышенное газовыделение в интервале  $570\text{--}600^\circ\text{C}$  идет практически без экстремума. В таком кварце подавляющая масса ГЖВ имеет размеры  $< 0.002\text{--}0.001$  мкм. Исследования концентратов  $I_{\text{ст}}$  (крупки фракций  $0.1\text{--}0.3$  мм) в иммерсионной жидкости выявили, что лишь в  $\sim 1/3$  от числа зерен можно встретить ГЖВ различных размеров. В случаях диагностируемых ГЖВ  $84\%$  их не превышают размера  $1$  мкм; укрупненные – до  $(3\text{--}5) \cdot (9\text{--}13)$  мкм – составляют всего  $\sim 3.3\%$ .

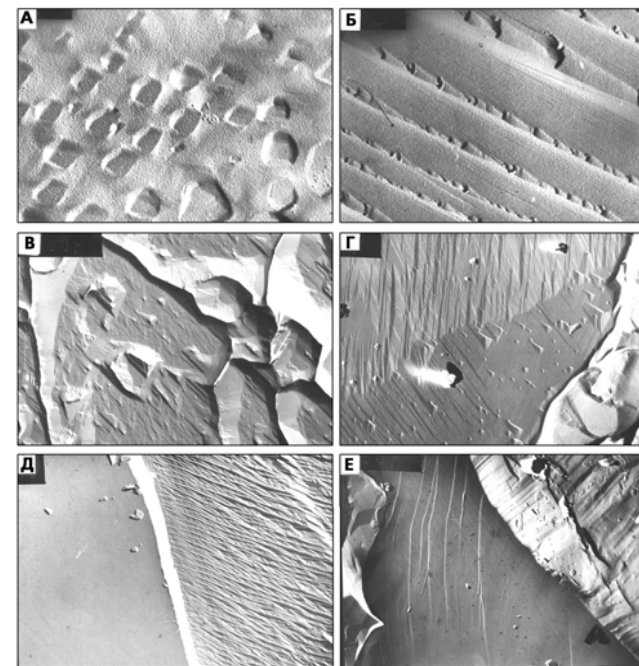


Рис. 3. Особенности строения породообразующих плагиоклазов из гнейсовидного плагиопегматита месторождения Спрус Пайн. а) – излом по межзерновой границе; б) – скол по сдвойникованному плагиоклазу; в) – природное травление по межзерновой поверхности; г) и д) – травление на сколах, в т.ч. с новообразованиями субзерен (г) и без них (д); е) – соединение зерен по излому и сколу. На фото д) и е) слева – контакты с кварцем. ЭМ: а), б), е) –  $\times 11000$ ; в) и г) –  $\times 4500$ , д) –  $\times 6600$ .

Газовой хроматографией при 600°C устанавливается газонасыщенность кварца в 79 ppm, из них на воду приходится 82.9%, на CO<sub>2</sub> – 14.0, на CO – 3.0, на CH<sub>4</sub> – 0.1%. Концентрация CO<sub>2</sub> = 3.8, CO = 1.3 моль/кг H<sub>2</sub>O. Масс-спектрометрические определения общей газонасыщенности крупки летучими компонентами выполнены по обогащенным концентратам в диапазоне до 1400°C: устанавливается, что общее количество газов в сорте I<sub>СТ</sub> по весу составляет всего 60–65 ppm. Это сопоставимо с таковым для ряда высокотемпературных российских месторождений с т.н. «гранулированным кварцем», но в 2–3 раза меньшее, чем в относительно низкотемпературных жильных крупнозернистых образованиях Урала [28]. В составе летучих около 50% приходится на воду, количества H<sub>2</sub> могут достигать 0.4, N<sub>2</sub> ~ 0.01 ppm, остальное – углеродсодержащие компоненты. Характерно, что основная масса газов удаляется уже до 700–800°C. Рассчитанные В.А.Крейсбергом коэффициенты диффузии основного компонента – воды достигают 7.6\* - и 45\*10<sup>-14</sup> м<sup>2</sup> см<sup>-1</sup> для 1000° и 1400°C, соответственно. Они гораздо, в 2–3 раза, выше, чем в крупнозернистых разностях жильного кварца, но вполне сопоставимы с некоторыми гранулированными разностями.

Электронная микроскопия (ЭМ) выявила много специфических деталей строения ЮТА-кварца, о чем кратко отмечалось ранее [22]. На рисунке 4 иллюстрируются разные стадии эволюции кварца и показаны выделения в нем самостоятельных субиндивидов, образовавшихся в связи с деформациями после кристаллизации плагиопегматитов. Фотографии д) и е) свидетельствуют, что на поверхностях раздела зерен кварца могут присутствовать разные минеральные фазы, очевидно, в зависимости от физико-химических особенностей порций флюида в конкретных участках пегматитовых тел. На рисунке 5 два верхних снимка – это сколы, где видно, как чисты они у этого кварца. На них, однако, встречаются сильно меняющиеся по размерам поры, иногда – бороздообразные подтравленные трещины (б). На фото в) и г) с разными увеличениями изображены ямки травления после обработки кварца кислотами при подготовке крупки сорта I<sub>СТ</sub>. При еще более крупных увеличениях – на фото г) и д) показано, как выглядят дислокации на просвет. ЭМ-исследования позволили установить следующее.

1. Поверхности раздела между кварцем и плагиоклазом чистые, четкие, довольно простые. Фазы других минеральных образований обнаруживаются редко. Как результат наложенного динамометаморфизма отмечены субзерна новообразованного кварца. Очевидные признаки природного травления (± тонкое фасетирование) на начальной стадии бывают выражены мелкими (размером 20–30 нм) ямками, которые похожи на мельчайшие ГЖВ. Однако, как типичные ГЖВ, так и поры являются редкостью.

2. Плотность распределения дислокаций в среднем 3·10<sup>8</sup> см<sup>-2</sup>. Скорость деформаций рассчитана в 10 сек<sup>-1</sup>. Дислокации хорошо диагностируются после обработки I-кварца агрессивными средами. Но весьма необычно, что характерных для многих природных кварцев малоугловых границ и деформационных сеток не наблюдается.

Важные признаки условий формирования плагиопегматитов фиксируются особенностями граната. Встречается он там спорадически в виде округлых, иногда скелетного строения зерен размером до > 2 мм. На микроанализаторе JXA-5 определен его состав: SiO<sub>2</sub> – 36.8, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 21.35, ΣFeO – 22.5, MnO – 10.4, MgO – 1.5, CaO – 7.45 мас.%, что в миналах соответствует 49.8% альмандина, 23.3 спессартина, 20.9 гроссуляра и 5.9% пироба (расчеты Г.Б. Ферштатера и Н.С. Бородиной, – ИГиГ, Екатеринбург). Высокие содержания Ca и Mn – один из признаков подобных типов граната, как, например, отмечаемых [Перчук Л.Л., 1971] в эвлизитах и в редкометальных типах пегматитов [17], тогда как в слюдоносных гранатах содержат больше альмандинового и пиропового миналов. Соотношения спессартин / пироп в мамских пегматитах ~ 3.4 [12], а в спруспайновском ~ 4.0. Доля спессартинового минала в гранате плагиогранит-пегматитов Мамского района тоже высокая (до 19,9%), достигая 21.2% в ассоциациях кварц-мусковитового замещающего комплекса. Но все же доля альмандинового минала в них значительно выше (≥ 67%) при невысоких значениях гроссулярового (< 1–4%). Особенности граната фиксируют различия условий формирования пегматитов собственно слюдоносных типов и спруспайновским – кварц-мусковит-плагиоклазовым – КМП-подтипом, являющимся, очевидно, переходным к мусковитсо-

держашему керамическому [17,18 и др.].

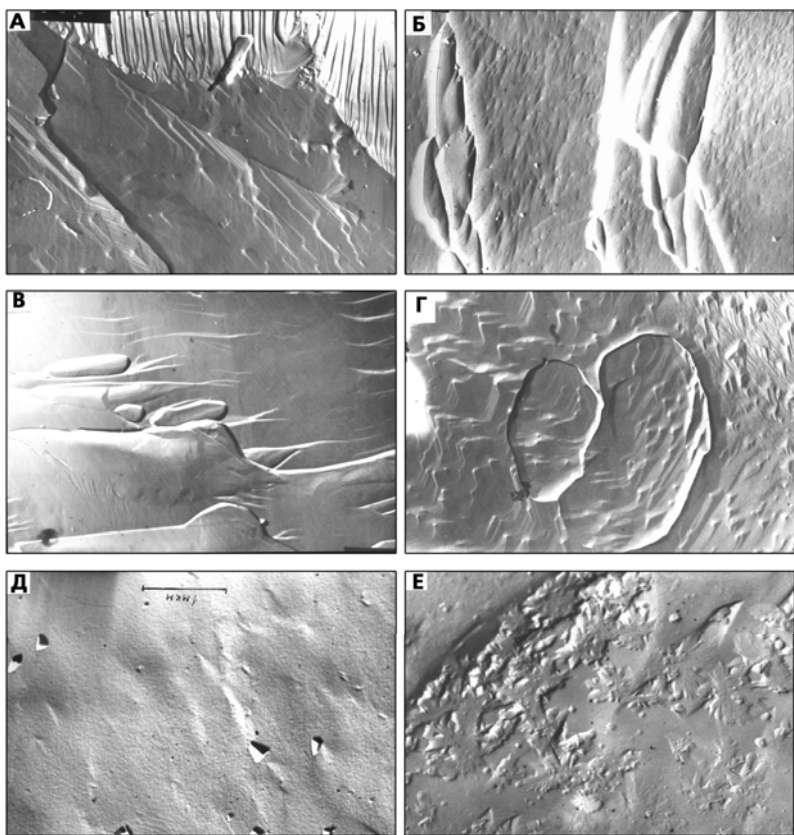


Рис. 4. Детали естественного травления и роста на порообразующем кварце, образования в нем субиндивидов и распределения примесных микрофаз.

а) формирование бороздок травления на зараставших микротрещинах на сколах кварца; б) травление вдоль новообразованных субзерен; в) отдельные новообразования субзерен на сколе кварца; г) интенсивное травление вокруг субзерен и на выходах дислокаций; д) и е) формы выделения примесных фаз с признаками слабого травления кварца, в т.ч. е) на крупке I<sub>СТ</sub> 1992 г. ЭМ: а) x 9900; б),в),г) x 6500; д) x 16600, е) x 8850.

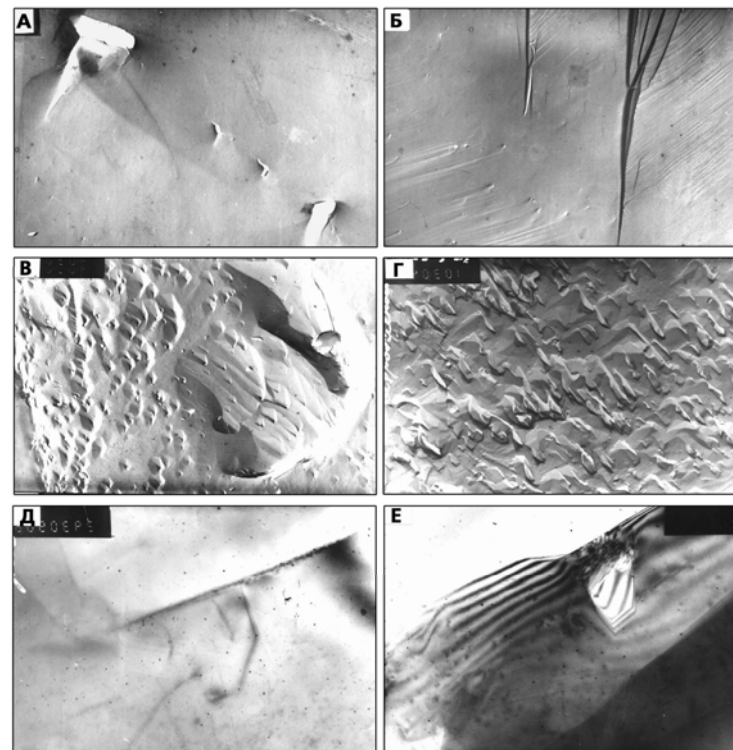


Рис. 5. Дислокации и поры в исходном и кислотнo-обработанном кварце. а) и б) сколы исходного кварца из плагиопегматита, на которых присутствуют отдельные мелкие поры; в) и г) ямки природного и искусственного травления по выходам дислокаций (по крупке I<sub>СТ</sub>); д) и е) морфология дислокаций на просвет, в т.ч. на е) возможно зафиксирована пора. ЭМ: а) и б) x 6500; в) x 4300; г) x 11000, д) x 32000; е) x 65500.

Прочие минеральные компоненты плагиопегматитов спрусспайновского района отмечаются как аксессуарные, особенно апатит и ортит. Эпидот неоднороден по составу, с изменчивой железистостью. Есть относительно идиоморфные зеленоватые кристаллы размером  $\geq 1$  мм, часто – с ортитовым ядром, другой эпидот – в виде тонкой сыпи в отдельных зернах плагиоклаза или скелетных зерен в парагенезисе с гранатом.

Приводимые сведения по спрусспайновским пегматитам можно рассматривать как признаки слабого проявления эпигенетических гидротермальных процессов.

## 5. Результаты изучения физико-химических свойств айота-кварца

По рентгенофазовым анализам (Г.Л.Ахметова – ВНИИСИМС и С.Л.Вотьяков – ИГиГ) концентраты  $I_{CT}$  диагностируются как  $\alpha$ -кварц с соотношением интенсивностей рефлексов  $I_{[110]} / I_{[102]} = 1.35$  и  $I_{[102]} / I_{[111]} = 1.7$ .

Рентгеноструктурные анализы (РСА) с точностью замеров по  $a_0 \pm 0,00003$  и по  $c_0 \pm 0,00004 \text{ \AA}$  (В.С. Коваленко) выполнены по крупке  $I_{CT}$  (7 ан.) и по хлорированным концентратам сорта  $I_4$  (9 ан.). Ближе к исходному сырью является  $I_{CT}$ ; для него по РСА средние значения  $a_0 = 4.91292$  и  $c_0 = 5.40436$ ;  $V = 112.967 \text{ \AA}^3$ . У глубоко обогащенных сортов они соответствуют значениям:  $4.91277\text{--}5.40432\text{--}112.959$ . Существенное уменьшение при обогащении значений параметра  $a_0$  соответствует освобождению айота-кварца от щелочных ЭП, находящихся в каналах его решетки. Значения параметров исходного I-Q весьма близки по РСА таковым для гранулированного кварца кыштымского района Ю.Урала. Этим подчеркивается близость температур их образования. У крупнозернистого кварца [28] значения параметра  $c_0 \cong 5.4034\text{--}5.4039 \text{ \AA}$ , поскольку у них, как известно [7], меньше структурных ЭП в узлах решетки. По данным ВИМСа [17-18 и др.] кварц из мамских плагиопегматитов имеет (по данным 33 ан.)  $a_0 = 4.9124$  и  $c_0 = 5.4049 \pm 0.0001 \text{ \AA}$ ; несколько повышаются значения  $c_0$  у кварца из кварц-мусковитового замещающего комплекса (до 5.4051) при возможном понижении значений  $a_0$  (до 4.9123). Таким образом, РСА-критерии кварца противоречат предположению об аналогии спрусспайновских и мамских плагиопегматитов.

Рентгено- и термостимулированные люминесцентные (РЛ и ТСЛ) исследования концентратов  $I_{CT}$  выполнялись по методике ИГиГ [4], частично в ИГФМ на Украине [8]. На графике а) рис.6 в относительных единицах показаны позиции кварца наиболее известных в РФ объектов и – относительно их – точка «I-Q».

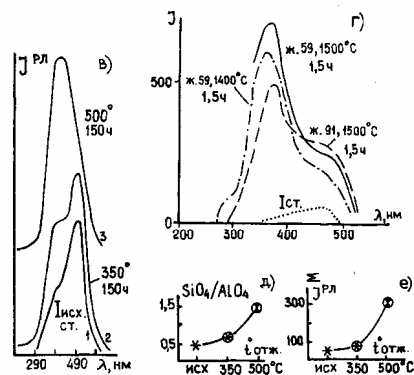
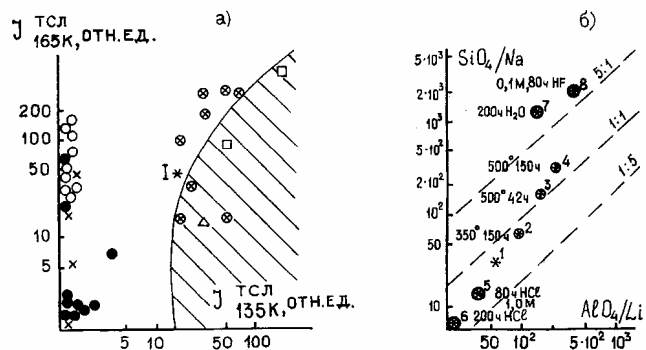
105

Естественно, последняя расположена вблизи поля породообразующего кварца гранитоидных пород [4], демонстрируя близость I-Q к силекситам и высокотемпературным гранулированным жильным типам кварца. Отчетлива дистанционность I-Q от жильного крупнозернистого кварца Приполярного и Южного Урала, а также от гидротермального кварца ряда рудных месторождений. Подобная тенденция – также при сопоставлении количественных оценок основных центров люминесценции (ЦЛ) –  $AlO_4/Li$  и  $SiO_4/Na$  [4]. По поведению ЦЛ при отжигах – наибольшие отличия от крупнозернистого жильного кварца, – рис. 6 в),г). Значения соотношения ЦЛ  $SiO_4/AlO_4$  и яркость свечения (или интенсивность =  $I_{рл}$ ), при отжигах, как правило, возрастают (рис.6, - д,е), но у айота-кварца трансформируется форма графиков, – они становятся унимодальными (рис. 6 в).

Особенно специфично поведение в айота-кварце  $AlO_4/Li$  – ЦЛ при обработке кислотами (рис. 6 -б). С резким уменьшением соответствующих значений при длительных прогревах с водой или с HCl (см. тчк. 2-6) коррелируется тенденция распада литийсодержащих ЦЛ. При барических условиях обработки I-Q в HCl отчетливо общее уменьшение яркостей ЦЛ как признак уменьшения дефектности структуры. Следует отметить, что у других типов кварца [4] тоже меняются соотношения ЦЛ, но уже с другими значениями и динамикой. Все такие факты предопределяются спецификой дефектности кварца разного генезиса. По РЛ-параметрам айота-кварц относится к фазе с высокой степенью кристалличности, что, в частности, косвенно подтверждается [1, 22] его замедленной аморфизацией под действием пучка электронов при ЭМ-исследованиях.

Достаточно разносторонне на сегодня исследован химический состав I-Q, в т.ч. по фактору его (существенной) изменчивости в процессах прецизионной очистки. По данным таблицы 1 отчетливо, что к сорту  $I_8$  резко снижаются содержания таких ЭП как Al, Fe, Na, K, Li и др. Структурные ЭП из узлов решетки – Ti, Ge и Al – удаляются хуже. Позиция и роль Ca пока не вполне понятны; впрочем, неменяющиеся содержания Ca могут быть связаны с технологией обогащения [27,32]. По данным ЭПР-анализов при сравнении содержания структурного Al (=C<sub>Al</sub>) устанавливается, что измеряемые его количества методом ЭПР (6.3–7.5 ppm) близки к валовым (7–8 ppm). По-видимому, обо-

106



- месторождения Додо, Желанное, Пуйва, крупнозернистый кварц, Приполярный Урал
- месторождения Новотроицкое, Караяновское, Астафьевское и др., Южный Урал
- × кварц рудных жил Урала
- ⊗ месторождения Кыштым, Кузнечиха, Ларино, Светлая Речка
- △ крупка глубокого обогащения: Кыштым, ж.175
- месторождение Максимиха

Рис. 6. ТСЛ и РЛ-характеристики I-(айота)-кварца США

*a* – соотношение интенсивностей пиков ТСЛ I-стандарт ( $I_{ст}$ ) с жильным кварцем разного генезиса из объектов РФ. Заштриховано поле кварца гранитоидов; *b* – изменение РЛ-параметров  $I_{ст}$  – кварца при разных условиях его обработки; *в* и *г* – спектры РЛ  $I_{ст}$  после отжига при разной температуре, в т.ч. в сравнении с жильным кварцем из ж. 59 и 91 месторождения Додо; *д* и *е* – отжиги длительностью 150 часов, в т.ч.: *д* – соотношение дефектов  $SiO_4/Na$  и  $AlO_4/Li$ ; *е* – динамика изменения интегральной яркости. Утолщенные контуры знаков – для условий барической обработки при  $P = 0,2-1,0$  кбар.

гашение позволяет приблизиться к содержаниям ЭП, находящимся только в структуре кварца. По  $C_{Ti}$  и  $C_{Ge}$  данные не так показательны, поскольку методом ЭПР они фиксируются в 3–10 раз меньшими значениями содержаний, чем для сорта  $I_8$  (табл. 1). Возможно, Ti и Ge присутствуют в разных позициях и стандартным методом ЭПР полностью не обнаруживаются. По содержаниям основных ЭП, включая и относящихся к структурным, айота-кварц близок к группе высокотемпературного сырья [6-8].

Таблица 1

Содержания элементов-примесей в ЮТА-кварце США при разных степенях его очистки (в ppm)

ЭП	ЮТА-std (айота-стандарт = $I_{ст}$ )					Анализы концентратов до/после хлорирования $I_{ст}-I_4$		Прецизионно очищенные концентраты США $I_1/I_8$ по [27]
	полные ИСР-анализы полученные от Л. Юнга		Данные по главным ЭП		По лаб. ИАЭ РФ, 1998 г.	США, Quartz-technology	РФ, лаб. ИАЭ, 2001г.	
	до хлорирования	после хлорирования	по [32]	по фирме Юнимин [27]				
Al	19.9	19.1	17.2-17.7	16.2-22.0	15.3	16.2/15.9	15.4/15.1	8.0/7.0
Ti	1.0	0.96	1.1-1.7	1.3-1.4	1.3	1.1/1.06	1.05/1.02	1.4/1.2
Fe	0.5	0.1	0.7	0.26-1.5	0.8	0.21/0.08	0.15/0.115	0.15/<0.03
Ge	0.96	0.9	1.0-0.9		0.76		0.77/0.81	0.6
Ga	0.002	0.002			< 0.5		< 0.5	
Ca	0.9	< 1.0	0.5	0.5-1.5	0.45	0.37/0.37	0.31/0.35	0.6/0.5
Mg	< 0.02	< 0.02	0.1	< 0.05-0.08	0.17		0.07/0.08	< 0.05/< 0.02
Mn	0.035	0.026	0.1	< 0.05	0.2		0.06/0.01	< 0.05/< 0.02

Продолжение таблицы 1

ЭП	ЮТА-std (айота-стандарт = I <sub>ст</sub> )					Анализы концентратов до/после хлорирования I <sub>ст</sub> -I <sub>4</sub>		Прецизионно очищенные концентраты США I <sub>ст</sub> /I <sub>4</sub> по [27]
	полные ИСР-анализы полученные от Л. Юнга		Данные по главным ЭП		По лаб. ИАЭ РФ, 1998 г.			
	до	после	по [32]	по фирме Юнимин [27]				
	хлорирования				США, Quartz-technology	РФ, лаб. ИАЭ, 2001г.		
Cu	0.017	0.01	< 0.05	< 0.05	≤ 0.05		0.015/ < 0.01	<0.05/ <0.02
Pb	0.04	0.01			< 0.1		< 0.02	
Cr	< 0.005	< 0.005	< 0.05	< 0.05	0.06		< 0.01	<0.05/ <0.02
V	0.02	< 0.01	< 0.05	< 0.02	< 0.05		< 0.2	< 0.02
Ni	0.01	0.005	0.08	< 0.05	0.06		< 0.02	<0.05/ <0.02
Co	< 0.001	< 0.001	< 0.05		< 0.03			< 0.0005
Na	1.0	0.01	1.0	0.9-1.5	1.0	0.79/ 0.055	0.77/ < 0.4	0.08/ 0.03
K	0.6	0.2	0.8-0.6	0.6-1.5	0.6	0.55/ 0.21	0.6/0.2	0.07/ <0.04
Li	0.75	0.7	0.7-0.6	0.9-1.5	0.6	0.69/ 0.715	0.68/ 0.62	0.15/ < 0.02
Rb	0.0025	0.001						
Cs	0.0005	0.0005						
B	0.02	0.02		0.08-0.1	0.087			0.04/ < 0.04
P	< 0.1	< 0.1	0.08	0.1-0.2	< 0.5			0.05/ 0.05
Sr	0.012	0.011	< 0.05	< 0.3	0.04		0.011/ 0.008	
Ba	0.030	0.026			0.034		0.022/ 0.037	
Zn	0.02	0.01	< 0.05-0.1	< 0.05	0.08		< 0.01	
Zr	0.44	0.015	0.8	0.4-1.3	0.75		0.73/ 0.08	0.1/< 0.1
Hf	0.02	< 0.001						
Be	0.001	0.001						
Bi	0.0005	< 0.0005						
Cd	< 0.0005	0.0005			< 0.02			
Hg	< 0.001	0.002						
U	0.0361	0.0086						
Th	0.0171	0.0013						

Продолжение таблицы 1

ЭП	ЮТА-std (айота-стандарт = I <sub>ст</sub> )					Анализы концентратов до/после хлорирования I <sub>ст</sub> -I <sub>4</sub>		Прецизионно очищенные концентраты США I <sub>ст</sub> /I <sub>4</sub> по [27]
	полные ИСР-анализы полученные от Л. Юнга		Данные по главным ЭП		По лаб. ИАЭ РФ, 1998 г.			
	до	после	по [32]	по фирме Юнимин [27]				
	хлорирования				США, Quartz-technology	РФ, лаб. ИАЭ, 2001г.		
Cu	0.017	0.01	< 0.05	< 0.05	≤ 0.05		0.015/ < 0.01	<0.05/ <0.02
Σ TR	0.05	0.013						
W	0.002	0.001			< 0.5		< 0.1	
As	< 0.05	< 0.05			< 0.2			
Sb	0.0015	0.0005						
Ta	0.001	< 0.001						
Nb	0.003	< 0.001	Суммы основных элементов-примесей (СЭП)					
Y	0.0425	0.0035	~24.8	22.5-31.6	22.5	>19.1/>18.4	20.7/18.9	11.5/9.1
Br	< 0.020	0.040						
Pd	0.02	< 0.001						
Os	< 0.001	0.001	Дополнительные данные о пределах ЭП:					
<i>Au &lt; 0.0001; Ag, Tl, In, Ir, Re, Pt &lt; 0.0005; Mo, Te &lt; 0.001; Sn &lt; 0.002; Sc &lt; 0.005; I, Se &lt; 0.01. Среди TR ниже чувствительности анализа (&lt;0.0005) указаны Eu, Ho, Lu, Tb, Tm, Pm.</i>								

По результатам химических анализов айота-кварца (табл. 1) можно констатировать, что по сравнению с гидротермальным жильным кварцем [7,8,28 и др.] американский продукт выделяется несколько повышенными содержаниями Zr, Br, Mn, Ge, B, U. По сравнению, например, с кварцем объектов Приполярного Урала, в нем побольше также Hf, V, Nb, Hg и TR. В айота-кварце сумма Ce и La выше в 2–3 раза, Yb – в ~ 2 раза, чем в крупнозернистой разновидности уральских объектов метаморфогенно-гидротермального [28] типа. В исходном сырье последних более высокие содержания Ca, Fe, Na и K, являющихся преимущественно компонентами минералообразующих растворов. Результатам анализа материалов [7,8 и др.] соответствует вывод, что петрогенетические и физико-химические параметры формирующих кварцевое сырье геологических сред функционально отражаются составами ЭП кварца. Специфичность айота-кварца по ЭП очевидна.

## 6. Прогнозные критерии на пегматитовые образования с кварцем типа айота

Разработка и использование прогнозных и поисково-оценочных критериев, как известно, базируются на сравнительном анализе совокупности параметров состояния (факторов) для подлежащего оценке объекта и – по возможности – такого же набора параметров (факторов) для эталонного объекта. Здесь в качестве эталонного рассматривается район Спрус Пайн, разнообразные сведения по которому приведены выше. Набором таких сведений а priori предусматривалась возможность оптимизации результатов при использовании синергетических взаимосвязей всех анализируемых признаков и явлений ими отражаемых; в данном случае – в лейтмотиве особенностей локализации и петрогенезиса плагиопегматитов типа КМП. При тестировании признаков для выбора районов поисков КМП в рекогносцировочном варианте представляется рациональным обратить внимание на следующие особенности.

1. Расположение вмещающих комплексов на мощной континентальной коре, в геодинамической обстановке пассивной континентальной окраины, при полициклическом проявлении комплементарных процессов регионального зонального метаморфизма и гранитообразования, в т.ч. при формировании гранитогнейсовых комплексов (куполов).

2. Среди субстрата широкое распространение пород повышенной основности – существенно полевошпатовых ( $\pm$  амфиболы) при подчиненном развитии глиноземистых обогащенных щелочами метапелитовых ассоциаций.

3. Сочетание процессов метаморфической дифференциации и полиформного реоморфизма при преобладании натриевого геохимического профиля процессов мигматизации и гранитизации субстрата; среди плагиогранитоидов заметное распространение собственно [16] трондjemитов как пород с минимальными содержаниями калия при высоких – натрия и кальция.

4 Барроуский тип основных циклов регионального метаморфизма; при P-T-параметрах амфиболитовой фации с кианитом в качестве индекс-минерала.

5. Редуцированность регрессивных стадий минерагенеза в режимах их пониженной щелочности; повышенная сохранность равновесных парагенезисов, в т.ч. как показателей невысокой

степени окисленности флюидов при возможных  $P_{H_2O} < P_S$  и нематричных значениях  $P_{CO_2}$ .

6. Развитие гранитоидных комплексов известково-щелочной серии с доминированием лейкократовых пород пониженной щелочности; типоморфизм пегматоидных структур гранитоидов с преобладанием среди слюдистых их минеральных фаз мусковита. Как результат интенсивного реоморфизма в литологически специфических комплексах заметное значение могут приобретать трондjemиты.

7. Обильное распространение пегматитов при отсутствии силекситов, грейзенов и кварцевых жил. Плагиопегматиты, составляющие значительную долю среди всех пегматоидов, как производные ранних стадий процессов пегматитообразования с унаследованием состава плагиогранитных разностей вмещающего их субстрата. Плагиопегматиты как переходный от керамических к слюдисто-керамическим своеобразный кварц-мусковит-плагиоклазовый (КМП) петрогенетический подтип, характеризуемый отношением плагиоклаз / кварц до  $\sim 3:1$  при содержаниях мусковита до 20–25%, присутствием граната с высоким содержанием спессартинового минала, отсутствием зональности и наличием гнейсовидности пегматитовых тел.

8. Литофильный геохимический профиль геологических комплексов, локализирующих КМП-пегматиты; отсутствие вблизи последних эндогенных рудных объектов.

9. Типоморфизму кварца КМП-пегматитов соответствует группа специфических его физико-химических свойств. Во-первых, это высокотемпературный кварц с высокой степенью кристалличности. Во-вторых, по сравнению с высокотемпературным кварцем других типов он значительно менее [7] примесный (например, в айота-кварце в отличие от кварца слюдоносных пегматитов содержание лития до 2–5 раз меньше, а по сравнению с кварцем редкометальных пегматитов – до 1–2 [8] порядков). В-третьих, этот кварц имеет низкую газонасыщенность. В-четвертых, он достаточно высоко технологичен, в т.ч. по причинам ровных границ его сростаний с другими минералами, незначительности его прорастания последними.

10. Определяющими факторами кристаллизации айота-кварца являются  $T \sim 550\text{--}650^\circ\text{C}$ ,  $P \geq 5.5\text{--}6.5$  кбар., относительно «сухие» условия флюидизации при общей пониженной щелоч-



ности процессов минерагенеза.

Кратко суммируя отмеченное в предыдущих 10 пунктах, нельзя не обратить внимание на большое количество факторов и сложности функциональных и опосредованных их взаимодействий как причин качества кварцевого сырья [1,4,7,8,10,14,32 и др.].

## 7. Некоторые выводы о потенциальной перспективности отдельных регионов

Очевидно, что по текущему состоянию изученности аспектов рассматриваемой в статье проблемы какие-либо строго обоснованные прогнозные заключения сделать нельзя. Ниже приводятся лишь сведения, характеризующие некоторые объекты по ряду отражающих условия минерагенеза признаков. Анализ набора таких объектов и признаков соответствует информации для разработки значимых петрогенетических и промышленно-оценочных критериев для российского кварцевого сырья типа I-Q. Не менее очевидно также, что излагаемое имеет не столько даже предварительный характер, сколько является поводом для размышления с целью выбора подходов к конкретным решениям.

В такой связи начать целесообразно с рекогносцировки областей развития слюдоносных пегматитов при учете отнесения к таковым [12,17 и др.] и ряда объектов в районе Спрус Пайн в Южных Аппалачах. На территории России пегматитов с мусковитом очень много. Основные районы их локализации рассмотрены в работе [12]. При обзоре некоторых из них здесь использованы данные из работ сотрудников ВИМСа – [17,18], частично – оригинальные [7-9]. Результаты анализа этих данных позволяют констатировать, что слюдоносные пегматиты имеют разный генезис. Это, в частности, отражается фактами выделения переходных их групп как слюдяно-керамические и редкометально-мусковитовые, а также разнообразных подтипов по сочетаниям микроклина, плагиоклаза, слюд и кварца [17]. Сколько-нибудь детально не сопоставляя известные слюдоносные районы, предлагается обратить внимание на специфические черты их минерагении, которые, по мнению авторов, могут существенно предопределять эффективность комплексных оценок

перспективных эдуктов, включая аспект получения из них высококачественных продуктов типа ЮТА-кварца США.

Беломорская провинция [17] или Беломорский пояс [12] включает ряд зон локализации слюдоносных пегматитов. В Кольско-Норвежской зоне пегматиты – в основном редкометально-мусковитовой группы, с присутствием редкоземельных. Там есть анатектические плагиограниты, но нет ареально-фоновой плагиомигматизации. Локализация пегматитов в силлиманитовой зоне метаморфитов, экстенсивность разнообразных процессов метасоматоза, в т.ч. гранитизации, можно интерпретировать как признак относительно пониженных (например, по сравнению с районом Спрус Пайн) давлений и активного проявления процессов регрессивных стадий минерагенеза, в т.ч. щелочной стадии. Все это может оцениваться в качестве благоприятных условий формирования в пегматоидных ассоциациях минеральных фаз высоко-примесного кварца [6,10 и др.], т.е. не как ЮТА-кварца. Этому соответствует пример изучения кварценосных образований Стрельниковского поля, где граниты нередко имеют пегматоидный облик, являются двуполевошпатовыми, сопровождаются силекситами и кварцевыми жилами, а метаморфизм характеризуется условиями дистенсиллиманитовой субфации. Кварц силекситов – с высокими значениями ЭП и содержаниями  $Li = 1.8-2.9$  ppm [8], что не соответствует характеристикам высококачественного кварцевого сырья; по количествам ЭП кварц пегматитов еще хуже. Возможно, несколько выше качество кварца слюдяно-керамических пегматитов в амфиболитах Северо-Карельского пояса, но для них прогнозно-негативны факты пониженных барических условий метаморфизма вмещающих пород (что косвенно соотносится с пегматитовыми образованиями).

Особенно значительны пегматитопоявления (в т.ч. промышленно-слюдоносные) в Чупинском сегменте Беломорского складчатого пояса. Анализ геологической ситуации позволяет выделить западную часть Чупинского блока как наиболее перспективную на высококачественный кварц в пегматоидных породах. Наряду с широким развитием там плагиомигматитов, включая разности плагиобластеза, как прогнозно-положительные признаки следует оценивать обстоятельства присутствия (около 70%) в хетоламбинской серии амфиболсо-

державших пород повышенной основности и устойчивость – от цикла к циклу – режима высоких давлений при метаморфизме их. Однако не вся территория к западу от Чупинской свиты может оцениваться как перспективная в связи с признаками наличия площадей с распространением обогащенных биотитом мелкозернистых гранитоидов (и плагиогранитоидов), с калишпатовой мигматизацией, с интенсивными метасоматическими преобразованиями пород.

Среднеуральские слюдоносные объекты в районе Уфалейского антиклинория (гнейсо-мигматитового комплекса) изучены детально, в т.ч. по характеристикам кварца в пегматитах, силекситах и кварцевых жилах с гранулированным мелкозернистым и другими типами кварца; изучался также кварц из каолиновых кор выветривания по лейкократовым гранитоидным породам [21]. Данный район, в отличие от типичных промышленно-слюдоносных, характеризуется большой распространенностью кварцнесущих образований, особенно в виде крупных тел силекситов и разных кварцевых жил. В последних кварц неоднороден по качеству; промышленные типы сырья – в основном из относительно высокотемпературных жил с гранулированным кварцем. По ряду физико-химических параметров такой кварц близок с типом ЮТА [7,8 и др.], но обогащается гораздо труднее [14]. Кварц из кор выветривания [21] резко отличается от ЮТА-кварца: в нем даже после обогащения в 2–8 раз более высокие содержания Al, Ti, Li и других ЭП. Имеются и другие сведения о том, что кварцевое сырье из калишпатовых разновидностей пород и кор выветривания по ним не является промышленно-перспективным.

В связи с обсуждаемыми материалами, вне авторского акцентирования, в многообразии аспектов выявляется обстоятельство невозможности оценивать перспективность конкретных районов при учете каких-либо единичных или ограниченного набора факторов (принципиально этому не противоречит возможность разработки мощного одного критерия, функционально аппроксимирующего взаимосвязи многих факторов, – но это не для ближайшего будущего). В таком плане информативен пример южноуральского Кочкарского антиклинория с крупным Пластовским массивом плагиогранитоидов, где пегматиты приурочены к более молодым двуполевошпатовым двуслюдяным

разностям. Где есть редкометалльные и хрусталеносные пегматиты, формировавшихся в условиях  $\sim 540\text{--}610^\circ\text{C}$ ,  $P \leq 4\text{--}5$  кбар,  $C > P_{\text{CO}_2}$ , при повышенной щелочности регрессивных этапов минерагенеза [9]. В районе весьма примесным является кварц не только пегматитов, но и жильных образований [8]. То есть, располагая сведениями, например, что во многих уральских плутонометаморфических комплексах есть ареалы интенсивной плагиогранитизации и площади с наличием трондjemитов, и т.д. и т.п., без специального анализа территорий не будут корректными суждения о перспективности последних на породы типа I-Q-содержащих.

По главному российскому слюдоносному Мамскому району сведения обширны [12,17 и др]. Здесь можно лишь подчеркнуть, что распространенность там метапелитов, интенсивное проявление разнообразных слюдогенерирующих процессов при повышенных  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  и  $P_{\text{CO}_2}$  [12] способствовали формированию в породах кварца, содержащего много ЭП в его решетке [7], обычно на порядок более высоком уровне, чем в типе ЮТА.

Для территориально близких к Мамскому районов Северного Прибайкалья реконструируются специфические для каждого особенности. Стиль эволюции субстрата Байкало-Муйского пояса как протофиолитовой зоны характеризуется относительно высокой флюидопроницаемостью с признаками высоких  $P_{\text{CO}_2}$  и щелочности, предопределяющей пространственную (и генетическую) сопряженность плагио- и калишпатизации. Распространенные в нерюндакской серии плагиогранитоидные образования являются мелкозернистыми и нелейкократовыми. Они часто содержат калишпат  $\pm$  магнетит, пироксен, цоизит, рутил и другие фазы, не типичные для гранитоидов Спрус Пайн, что также противоречит возможности нахождения там подобных американским плагиопегматитов. В Патомском районе вызывает интерес западная часть Олокитского прогиба, где особенности разреза и структур пород, развитие пегматоидных гранитоидов в совокупности может быть оценено как положительные признаки. В восточной части Патомского нагорья известно как слюдоносное Жуинское поле; в пегматитах мусковита мало, но заметное значение приобретают кварцевые ядра. Среди вмещающих пород преобладают метапелиты с силлима-

нитом; метасоматозу соответствовал режим повышенной щелочности; профиль пегматитообразования – с переходом к редкоземельному типу ( $\pm$  флюорит); оценка перспективности на высококачественный кварц может быть негативной.

Подобная оценка может быть сформулирована и для территории Хамар-Дабана, где метаморфизм андалузит-силлиманитового типа с пониженными параметрами общего давления, в т.ч. для этапов флюидизации, где минеральные ассоциации часто с неравновесными парагенезисами, где при широком развитии плагиомигматизации [12] лейкосома плагиогранитного состава мала по суммарному объему и представлена мелкозернистыми разностями, где есть пегматиты с ортоклазом и преобладают двуслюдяные (с биотитом), по сопутствующей минерализации являющиеся скорее мусковит-редкометалльными. По отмеченным признакам хамар-дабанская территория сопоставима с зоной Центрального Таймыра [12].

Восточные и Западные Саяны не относятся к значимым слюдоносным регионам, хотя пегматиты переходных типов с мусковитом в них встречаются [12 и др.]. Для Восточных Саян информативны такие черты их геологии, как примыкание к краю Сибирской платформы при тоналит-гнейсовом типе коры и распространенность гранитоидов повышенной основности. Аналогично можно обратить внимание на Джидинский и Ольховский комплексы, относимые к габбро-плагиогранитной формации [20]; с учетом петрохимических особенностей их магматитов можно предполагать нахождение в них плагиопегматитов, перспективных на высококачественное кварцевое сырье. С близкой позиции внимание обращают такие плутонические комплексы как Маинский (Зап. Саяны) и Олотский (Присаянье).

В работе [12] как несущие некоторую мусковитовую минерализацию упоминаются пегматиты Верхояно-Колымской области и Срединно-Камчатского хребта. Но на этих территориях доминируют калишпатсодержащие пегматиты, с которыми пространственно ассоциируют кварцевожилые тела. Для камчатских пегматитов устанавливается [8], что содержание ЭП в их кварце более чем в два раза больше, чем в типе I-Q; содержание Li резко варьирует от  $\sim 1$  до 6 ppm даже в кварце из пегматитов среди пород основного состава (габброноритов) при фо-

новом содержании лития 3.0–3.5 ppm. Все это противоречит оценке районов в качестве перспективных на кварц типа ЮТА.

Можно предполагать, что в России имеются и другие районы, перспективные на выявление продуктивных на высококачественный кварц плагиопегматитов, например, в Байкальской складчатой области, Восточной Туве, Горном Алтае, где, в частности, присутствуют комплексы пород габбро-гранодиорит-плагиогранитной формации (раннего и среднего этапов петрогенетических циклов). Вместе с тем, нет пока возможности оценить перспективы отдельных гранитоидных комплексов, сформировавшихся при высоких давлениях и при пониженной щелочности, в т.ч. таких как Pz<sub>1</sub>-возраста Бамянтуньский в Тайпинлин-Гродековой зоне Приморья [13], где главная фаза магматизма представлена крупными массивами плагиогранитов и трондьемитов.

По совокупности всех рассмотренных аспектов обобщающему выводу по прогнозной оценке территорий на сырье типа айота-кварца соответствует положение о комплементарности признаков наличия лейкократовых крупнозернистых ассоциаций плагиогранитного или плагиопегматоидного ряда (с преобладанием среди слюдистых парагенезисов мусковита) при площадном отсутствии кварцевых жил и грейzenов. В причинно-следственной взаимосвязи такие и рассмотренные выше другие сопутствующие им признаки, включая специфику химического состава айота-кварца, функционально детерминированы фактором минимального воздействия региональных и локальных процессов калиевых (как правило, относительно поздних) этапов корового петрогенезиса.

## 8. Заключение

Всемирно известный кварц типа ЮТА из плагиопегматитов США пока не имеет российских аналогов; относительно высокотемпературные разности кварца из подобных пород в России практически не изучались, хотя по кварцу из разнообразных прочих пегматитов информация обширна. Согласно последней, в существенно микроклиновых или в двуполевошпатовых пегматитах кварц характеризуется значительно большими содержаниями ЭП. Суммарное содержание 11–13 ЭП, обычно учитываемое как показатель качества кварцевого сырья промышлен-

ных типов, в кварце слюдоносных и хрусталеносных пегматитов в 2–5 раз выше, чем в ЮТА-кварце, в редкометальных и редкоземельных – на порядок большее [7]. Отечественная промышленность потребляет и потребляет (кроме привозного I-Q) преимущественно кварцевожильное сырье и дефицитно-дорогой горный хрусталь. В связи с объективностью сокращения и истощения отечественной базы высококачественного кварцевого сырья и необходимостью сохранения ресурсного потенциала актуальность поисков новых источников сырья не требует иных пояснений. В связи с направленностью таких поисков (согласно материалам статьи) не требует дополнительного обоснования и важная роль образований плагиопегматитового состава (или кор выветривания по ним), в т.ч. также по причине соответствия их сырьевым ресурсам комплексного использования. Примером эффективного промышленного освоения таковых являются месторождения района Спрус Пайн в штате Северная Каролина США. Кварц этих месторождений (как мало какой другой) поддается прецизионной очистке, чему соответствуют технологии обогащения [27, 32] фирмы ЮНИМИН.

Изложенному непосредственно выше прямо соответствует вопрос: актуальность проблемы поисков сырья типа ЮТА в основе своей предопределяется геологическим или технологическим, или собственно экономическим факторами? По текущему состоянию проблемы ответ неоднозначен, в т.ч., например, из-за невозможности на сегодня корректной оценки степени природной уникальности (исключительности) спруспайновских месторождений. И по такой причине в первую очередь необходима разработка прогнозных и поисковых критериев, включая оптимизацию последних по результатам специализированных геологических и технологических исследований.

На данном этапе, исходя из сведений общегеологического плана, в качестве потенциально перспективных (на кварценосные плагиопегматитовые породы) территорий выделяются: а) западная часть Чупинского блока Беломорского пояса, б) некоторые участки в западной части Олокитского прогиба Патомского нагорья, в) Ольховский и Джидинский магматические комплексы Восточных Саян, г) однотипные с последними Олотский в Присаянье и д) Маинский в Западных Саянах. По совокупности проанализированных признаков в прогнозном

аспекте представляют интерес также ряд площадей в пределах Байкальской складчатой области, в Восточной Туве, Приморье и другие, рассмотрение которых здесь ограничено рамками статьи.

В отношении роли экономического фактора можно подчеркнуть, что поскольку рассматриваются объекты, которые в значительной части представлены кварц-мусковитовыми плагиопегматитами, то, соответственно, можно говорить о возможности комплексного использования концентратов всех породообразующих минералов, т.е. не только кварцпотребляющими, – но и в других отраслях промышленности, что существенно может повышать рентабельность отработки таких объектов.

#### Благодарности:

Авторы признательны Данилевской Л.А. (ИГ Карельского НЦ) за помощь в сборе геологических материалов по штату Северная Каролина, сотрудником ВНИИСИМСа: Поликаниной Г.С. и Селищевой Л.В. за подготовку проб, Басмановой И.Н., Жекову М.В., Лаптеву А.В., Мендове Н.А., Прокофьевой Л.А., Тигетовой И.С., Тимофеевой О.И. за оформление рисунков и текста статьи, а также всем упомянутым во «Введении» коллегам, занимавшимся изучением свойств и условий образования ЮТА-кварца.

#### Литература

1. Балакирев В.Г., Мельников Е.П. Электронно-микроскопическая фрактография кварца/ Мингео СССР, ВНИИСИМС. М.: Недра. 1991.120 с.
2. Баркер Ф. Трондьемит: геологическая обстановка и гипотезы образования. // Трондьемиты, дациты и связанные с ними породы. М.: Мир, 1983 . С. 9-18.
3. Белоусов В.В. Геотектоника. Издательство МГУ, 1976. 334 с.
4. Вотяков С.Л., Крохалев В.Я., Пуртов В.К., Краснобаев А.А. Люминесцентный анализ структурного несовершенства кварца. Екатеринбург: УИФ Наука. 1993. 70 с.
5. Кинг Ф. Докембрийская геология США. М.: Мир, 1972. 299 с.
6. Крылова Г.И. Влияние флюидных режимов на специализацию и качество кварцевого сырья // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. Тез. докл. междунар. симпозиума, посвящ. 100-летию со дня рождения акад. А.Г.Бетехтина. М., 1997. С. 49-50.

7. **Крылова Г.И.** Тенденции изменений содержаний элементов-примесей в неметаллоносных (безрудных) кварцах в зависимости от их генезиса. // Минералогия России. Тез. докладов ежегодного собрания МО при РАН, посвящ. 300-летию горно-геологической службы России. С-Пб., 2000. С. 161-162.
8. **Крылова Г.И., Малышев А.Г., Пестриков Н.Н., Заднепровский Б.И.** Литий в природных кварцах // Геология, методы поисков и оценки месторождений тв. полез. иск. Обзор. М.: АО "Геоинформмарк", 1994, № 9. 50 с.
9. **Крылова Г.И., Остапенко Г.Т.** Параметры эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма в метапелитах Светлинской седловинной структуры (Южный Урал) // Теория и практика термобарогеохимии. М., 1976. С. 73-79.
10. **Крылова Г.И., Пестриков Н.Н., Скобель Л.С., Шатнов Ю.А.** Изменчивость состава кварцевых образований в зависимости от вмещающих их пород // Структура минер. мира. Тез. докл. Сыктывкар, 1997. С. 30-31.
11. **Луцицкая М.В.** Тоналит-грандьеимидовые комплексы Корякско-Камчатского региона (геология, геодинамика). М.: ГЕОС, 2001. 124 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 522).
12. **Макрыгина В.А., Макагон В.М., Загорский В.Е., Шмакин Б.М.** Слюдоносные пегматиты. Новосибирск: Наука, 1990. Т.1. 233 с.
13. **Маракушев А.А., Тарарин И.А., Залищак Б.Л.** Минеральные фации кислотности-щелочности гранитоидов, бедных кальцием // Минеральные фации гранитоидов и их рудоносность. М.: Наука, 1966. С. 5-72.
14. **Митрофанов А.А., Крылова Г.И., Митрофанов А.Д., Скобель Л.С.** Использование типоморфных особенностей кварцевого сырья для оптимизации способов его обогащения // Традиционные и новые направления в минер. исслед. Тез. докл. ВМО. М., 2001. С. 94-95.
15. **Мурбат С.** Соотношения изотопов в метаморфических породах / Природа метаморфизма, т.2, М.: Мир, 1967. С. 243-278.
16. **Поляков В.Л.** Гранитоиды трондьеимитового тренда. Их химические составы. // Уральский геологич. журнал, 2001, № 6. С. 37-57.
17. **Сапожникова Л.Н., Ткачев А.В., Жукова И.А., Жуков Н.А.** Прогноз качества листового мусковита при региональных и поисковых работах (методические рекомендации). М.: ВИМС, 1995. 41 с.
18. **Ткачев А.В., Сапожникова Л.Н., Жукова И.А.** Геолого-промышленная классификация мусковитовых пегматитов как основа планирования, разведки и добычи минерального сырья. М.: ВИМС, 2000, № 10. С. 74-88.
19. **Ханн В.Е.** Тектоника континентов и океанов. М.: Научный Мир, 2001. 604 с.
20. **Харкевич Д.С., Москалева В.Н.** Серии магматических формаций как основа классификации складчатых областей и платформ // Проблемы связи тектоники и магматизма. М.: Наука, 1969. С. 29-46.
21. **Цюцкий С.С., Кусова Т.А.** Каолиновые коры выветривания – новый потенциальный источник кварцевого сырья России // Уральский геологич. журнал, 2000, № 3. С. 139-144.
22. **Balakirev V.G., Krylova G.I.** Results of IOTA-quartz electron-microscopic study. 31-th I.G.C. 2000, Brazil, abstract 8-6.
23. **Butler Y.R.** Map showing Paleozoic metamorphic facies. USA, 1984.
24. **DENR GIS Image Server**, North Carolina Department of Environment and Natural Resources. [http : // www.gis.enr. sbate. nc.us. /sid/bin/](http://www.gis.enr.sbate.nc.us/sid/bin/)
25. **Espenshade G.H., Potter D.B.** Kyanite, sillimanite and andalusite deposit in the Southeastern States. 1960. Prof. Pap. U.S. geol. Surv., 336 p.
26. **Harris L.D., Bayer K.C.** Sequential development of the Appalachian orogen above a master decollement – A hypothesis // Geology, 1979. Vol. 7, №12. P. 568-572.
27. **IOTA Haig Parity Quartz UNIMIN:** [http// www. Iotaquartz.com/corp. html.](http://www.Iotaquartz.com/corp.html)
28. **Krylova G.I., Skobel L.S.** The terms of localization and typomorphic characteristics of the quartz haw materials of the Prepolar Ural deposits. 31-th I.G.C., 2000. Brazil, abstract 11-5.
29. **Lesure F.G.** Mica deposits of the Blue Ridge in North Carolina // Geol. Surv. Prof. Paper. 1968, № 577. 124 p.
30. **Miller I.W., Eryer K.H.** Geology of the ashe metamorphic suite in the beaucatcher mountain road cut, Asheville, North Carolina // Southeastern Geology, 1996, v. 36, № 5. P. 133-152.
31. **Rankin D.W.** The continental margin of the eastern. North America in the southern Appalachians: the opening and closing of the plato – Atlantic ocean // Amer. Journ. Sci. 1975. Vol. 275 A. P. 298-356.
32. **Jung L.** High purity natural quartz. Quartz Technology, Inc., New Jersey. 1992. 550 p.