

Все перечисленные минералы – носители ЭПГ чрезвычайно мелкие – от единиц до первых сотен микрон – и доступны лишь для микрозондового анализа. Относительно Ni-кобальтинов высказано подтвержденное автором наблюдение [1-3], что наибольшие содержания ЭПГ приурочены к центральным частям крупных идиоморфных кристаллов. Автором установлено также, что содержания ЭПГ в Ni-кобальтинах из рудной линзы в подстилающих гнейсах обычно низкие. Это указывает на незначительный перенос ЭПГ при метаморфизме. Все эти наблюдения следует иметь в виду при дальнейшем технологическом изучении руд Карикьявра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дистлер В.В., Лапутина И.П. Сульфоарсениды никеля и кобальта, содержащие платиновые металлы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 3. С. 718–721.
2. Дистлер В.В., Лапутина И.П. Необычная ассоциация минералов платиновых металлов из расслоенного габбро-норит-лерцолитового массива на Кольском полуострове // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1981. № 2. С. 103–115.
3. Дистлер В.В., Генкин А.Д., Гладышев А.Д., Филимонова А.А. Новые данные о генезисе медно-никелевого и платинового оруденения // Проблемы петрологии, минералогии и рудогенеза. М.: Наука, 1983. С. 43–46.
4. Нерадовский Ю.Н., Кузнецова А.С., Пахомовский Я.А. О самородном висмуте и других минералах в медно-никелевом рудопроявлении Карикьявр (Кольский полуостров) // Зап. ВМО. 1982. № 5. С. 552–556.
5. Cabri L.J., Laflamme J.H.G. Mineralogy and distribution of PGE in mill products from Sudbury // Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Congress on Applied Mineralogy. - Los Angeles, Febr. 22-25, 1984. P. 911–922.

## МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ ПО СФЕРАМ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ (ФРАГМЕНТ)

*Морохов В.А.*

ФГУП «ВНИИСИМС», г. Александров Владимирской обл.

В порядке констатации известных специалистам сложившихся реалий приведём основные из них, в той или иной мере определяющих оценку состояния сырьевой базы высококремнеземистого, преимущественно кварцевого, сырья РФ [2, 5].

Запасы кварцев и кварцитов, учтённых Государственным балансом РФ, были разведаны в течение последнего 30 – 40 - летнего периода. В последующие годы на большинстве эксплуатируемых объектов в процессе понижения очистных работ произошли закономерные, свойственные практически всем месторождениям твёрдых полезных ископаемых, изменения качественных характеристик сырья (фазового состава минералов, физико-механических и петрофизических свойств, концентраций элементов-примесей и т.д.), определяющих в своей совокупности его технологичность. Отметим также, что на протяжении этого же периода «с нарастающим итогом» происходило изменение требований потребителей к качеству производимых горнорудными предприятиями продуктов-концентратов, их стоимостных характеристик, как правило в сторону удорожания, динамики добычи и потребления, усложнения технологий обогащательного передела, увеличения ассортимента, потребностей промышленности по стране в целом и по отдельным регионам. Научно-технический прогресс расширяет и увеличивает запросы различных отраслей промышленности в изделиях из высококремнеземистого сырья, тем самым пополняя список объектов деятельности вовлечением в сферу освоения его «нетрадиционных» разновидностей [10, 12, 13].

Сырьевые объекты отличаются генезисом, текстурными и структурными особенностями полезного ископаемого, его примесным составом, ассоциативной приуроченностью к другим минеральным группам и пр. Дифференциация по совокупности типоморфных признаков определяет не только генетическую принадлежность полезного ископаемого, но также его поликомпонентность и технологичность. По сути каждая разновидность высококремнеземистого сырья – горный хрусталь, жильный и гранулированный кварц, кварциты, кварцевые песчаники, мономинеральные кварцевые и полимиктовые пески, кварцсодержащие руды некоторых металлов и пр. – является природным технологическим типом. Заметим, что строгие качественные ограничения к «исходному» природному сырью, т.е. полезному ископаемому (кремнезёму), отсутствуют. Исключением из всего списка является горный хрусталь, участки кристаллов которого, лишённые трещин, свиелей, включений, двойников и пр., прошедшие механическое обогащение, рассматриваются в качестве промежуточных промышленных продуктов для пьезо- и оптических изделий [4, 6].

Для всех прочих основным доминирующим параметром является минеральный состав, где основной полезный компонент – кремнезём – в различных формах проявления. Очевидно не очень строго, на понятийном уровне, исходя из конкретно сложившихся определений, под аналогами полезных компонентов, извлекаемых из

полезного ископаемого (кристаллосырья, кварцевого сырья и пр.) всех генетических разновидностей, следует понимать промпродукты (концентраты) определённых фракций (монообласть, кусок, крошка, крупка, мука), содержащие допустимые предельные концентрации лимитируемых минеральных и элементов-примесей, газо-жидких и твёрдых включений, стандартизированных ГОСТами, ОСТАми, ТУ и СТП добывающих и потребляющих предприятий. Кроме этого, в качестве потенциального полезного компонента следует рассматривать кремний – элемент IV группы табл. Д.И. Менделеева.

Размерность фракций концентратов, качественные характеристики промпродуктов, а также их использование промышленностью (утилизация) определены эмпирическим путём на основании опытных плавок, конструкторских и технологических особенностей плавочных процессов, соответствия ТУ при гидротермальном синтезе. В связи с последними замечаниями понятия «полезное ископаемое, полезные компоненты» для высококремнеземистого сырья не являются строго однозначными типа «для варки, для плавки, для оптического стекловарения и т.д.». Они лишь означают последующий этап «утилизационного передела» и меняются в зависимости от потребностей промышленности, развития техники добычи, создания ресурсосберегающих технологий. Но в большинстве своём прослеживается так называемая «монокомпонентная» ориентация на производство кварцевой крупки, обязанная своим появлением требованиям промышленности в «особо чистом» кварцевом концентрате, потребности в котором растут ежегодно с нарастающим итогом, равно как и цены [14]. Следует отметить, что стоимость крупки сверхглубокого обогащения (J6 - J8 по международной классификации) сопоставима с ценой редкометальных, в частности Ta – Nb, концентратов. Поэтому понятен возникший бум на ряде кварцедобывающих предприятий с переходом на «монокомпонентное извлечение» крупки при сохранении, по сути, прежнего уровня технической оснащённости и схем обогатительного передела.

В порядке констатации необходимо отметить, что в последние 1.5 – 2 десятилетия значительные партии концентратов, поставляемые заводам-потребителям, по целому ряду свойств не отвечают существующим ГОСТам и ОСТАм. Более того, это становится правилом. Для приведения этих продуктов в соответствие со стандартами предприятий (СТП) практически на каждом из них созданы доводочные обогатительные линии, работающие по более сложным и глубоким, чем у поставщиков сырья, схемам [20, 22]. Эти схемы, со временем ужесточаются, поскольку не рассчитаны на постоянно меняющиеся свойства промпродуктов [13, 15, 16].

В связи с ужесточением требований промышленности, в частности регламента качества к концентратам для плавки по химическим и физическим свойствам, содержаниям элементов-примесей (ЭП), а, соответственно, падением стоимости поставляемых сырьевых продуктов и росте их себестоимости при переделе, запасы отдельных объектов из разряда активных перешли в категорию недостаточно изученных [24]. Вместе с тем ассортимент изделий, при выпуске которых происходит утилизация кварцевой крупки, возрос к настоящему времени до нескольких сотен наименований [14]. Эта тенденция роста, особенно в наукоёмких производствах, продолжает увеличиваться. Таким образом, в «кварцевой отрасли» возникли и продолжают появляться проблемы, обязанные своим возникновением как геологическим (нет технологической типизации сырья, недостаточно изучены вопросы изменчивости качества сырья в недрах, не реализована в большинстве случаев селекция запасов по совокупности свойств и т.д.), так и технологическим факторам. К последним следует отнести отсутствие рациональных схем обогащения и очистки. В качестве основного негативного итога влияния этих двух факторов является исключительно нерациональное отношение к природным ресурсам [17, 18]. По исследованиям и оценкам Г.И. Крыловой (2000г.) при переделе сырья в крупку суммарные потери составляют 80–90% (табл. 1). Суммируя вышесказанное по поводу «проблем» можно утверждать, что они обязаны своим возникновением нарушению принципов и условий фиксированной по времени стандартизации сырья начиная от разведки и заканчивая эксплуатацией месторождений. Сопровождающим стандартизацию этапом работ является унификация, т.е. введение единообразия (с определёнными допусками) как на совокупность параметров, характеризующих тип, вид сырья, так и на их величину, исходя из понятий эквивалентности измеряемых свойств в кластере, классе, таксоне. Под стандартизацией в данном случае следует понимать правила установления наиболее эффективного обеспечения единообразия [15].

Например, требования стандартов к сырьевым продуктам плавочного назначения весьма жёсткие как по содержанию минеральных и элементных примесей, так и его газо-жидким или водным компонентам. Для наиболее чистых из них и наиболее дефицитных разностей содержания суммы элементов-примесей (ЭП) не должны превышать 20 – 30 x 10 – 4% (ppm), минеральных – менее n x 10 – 3%, газонасыщенности – менее 40 – 80 ppm. По совокупности численных значений приводимых параметров подобные кварцы пригодны к использованию как в качестве «варочного» сырьевого продукта, так и в качестве шихты для гидротермального синтеза [11]. Однако, указанное признаковое пространство произвольно сужено технологическими ограничениями, поскольку для шихтового кварца важны параметры петрофизических и физико-механических свойств сырья, т.к. их уровень определяет растворимость в гидротерме и, как следствие, плавочные свойства кварца.

Таблица 1

Потери кварцевого сырья для плавки при операциях добычи и передела (по Г.И. Крыловой)

| Номенклатура потерь   | Оценки уровней потерь, % |                   |                           | Причины потерь |             |
|---|--------------------------|-------------------|---------------------------|----------------|-------------|
|   | По РФ: х/пределы         |                   | По технологии США для «J» | Генетические   | Технические |
|   | Фактические              | Реально возможные |                           |                |             |
| 1   | 2                        | 3                 | 4                         | 5              | 6           |
| Потери при добыче:  |                          |                   |                           |                |             |
| Отработка приконтактных зон (0.2 – 0.3 м мощностью)                       | $\frac{4}{2 - 9.4}$      | 2 – 3             | нет данных                | ++             | +*          |
| Переизмельчение в процессе БВР<br>Просыпания при добыче и транспортировке | $\frac{15}{8 - 20}$      | <10               | - « -                     | +              | ++          |
|   | 2 - 3                    | 1 – 1.5           | - « -                     |                | ++          |
| Потери при переделе:  |                          |                   |                           |                |             |
| Дробление и грохочение:<br>сухое:   | $\frac{>60}{50 - 93}$    | <40               | 9.5 (по кускам 2.5 см)    | +              | ++          |
|   | 22 – 30                  | <25               |                           | +              | ++          |
| мокрое:   |                          |                   |                           |                |             |
| Термодробление  | $\frac{15}{5 - 26}$      | 5 – 7             | **                        | +              | ++          |
| Электрогидравлическое импульсное  | до 41                    | ?7 – 8            | -                         | +              | +           |
| кускового материала:  | $\frac{70}{45 - 95}$     | <45               | -                         | ++             |             |
| Классификация: рассев крупки на рабочие фракции                           | до 30                    | 20 – 25           | >20                       | +              | +           |
| Сепарация крупки: фото «сортексная»                                       | $\frac{35}{20 - 85}$     | <15 – 20          | -                         | +              | ++          |
| магнитная   | $\frac{5}{1 - 8}$        | <5                | 20 – 25                   | +              | ++          |
| электростатическая  | $\frac{>5}{3 - 10}$      | <5                | -?                        | +              | ++          |
| лазерная  | 2 – 10                   | <2 ?              | -                         | +              | +           |
| Флотация крупки $\phi$ 0.1 – 0.4 мм                                       | $\frac{35}{20 - 50}$     | <20               | до 50                     | +              | +           |
| 1   | 2                        | 3                 | 4                         | 5              | 6           |
| Химическая или кислотная обработка и очистка крупки                       | 5 – 12.5                 | <5                | +                         | ++             | ++          |
| Общие фактические потери:   |                          |                   |                           |                |             |
| 27 – 37 операций: гранулированный жильный кварц                           | 80 – 95                  | >80               | -                         | ++             | +           |
| 12 – 19 операций: крупнозернистый жильный кварц                           | 82 – 85                  | 60 – 70           | >80 – 98                  | +              | ++          |
| 8 – 12 операций: горный хрусталь /синтезированные кристаллы/              | 30 – 40<br>42 – 67       | <30/40            | ?                         | +/?            | +/?         |

Примечание: \* - существенная (+) и основная (++) доли потерь; \*\* - операции не применяются (-).

Очевидно, что для оценок качества сырья и определения сферы его использования важно знать не только валовые составы полезного ископаемого, но также форму вхождения элементов-примесей (ЭП). Примеси из минеральных фаз или реликтовых включений минералообразующих сред (упрощённо – ГЖВ) могут быть отнесены к неструктурным. Относительно успешно они выводятся из подвергнутого обогащению переделу сырья. Экстракция элементов-примесей при обогащении, как правило, затруднена, более того при дальнейшем плавочном переделе они унаследуются стёклами или монокристаллами в процессе гидротермального синтеза [24, 27].

Из перечня технологических процессов горного производства, определяемого комплексом физических свойств полезного ископаемого, наибольший интерес, применительно к месторождениям высококремнеземистого сырья и поставленным задачам исследований, представляют процессы разрушения, т.е. дробления и измельчения. Систематизированные замеры физических свойств и вещественного состава (объекта труда, полезного ископаемого) определяют как режимы внешнего воздействия, так и ожидаемые результаты. Так, например, основной результат, получаемый на стадиях дробления и измельчения – экстрагирование зёрен кварца и, частично, включений с их последующей сепарацией и фракционированием концентратов. Здесь очевидна связь итоговой составляющей этого процесса: «чистота» получаемого концентрата зависит от размерности фракции. Она (размерность) должна быть, с одной стороны, оптимальной для последующего утилизационного, т.е. плавочного, передела, а с другой способствовать максимально возможному «уносу» кристаллизационной воды и ЭП.

Природа направленного избирательного разрушения кремнезёма транскристаллитная (внутри зёрен) и интеркристаллитная (межзерновая). Интенсивность его проявления зависит как от внешних факторов воздействия, так и прочностных особенностей сырья. Под последними следует понимать совокупность уровней дефектности кристаллической решётки отдельных зёрен и их агрегатов, а также концентраций, формы, вида включений, т.е. от степени «гетерогенности» отдельных структурных элементов полезного ископаемого [28, 29].

Одним из теоретических обоснований определения последствий воздействия процесса дробления (измельчения) на минеральное сырьё является так называемый эффект Ребиндера (РЭ) [23]. Доказанная экспериментально суть его – адсорбционное понижение прочности минерального сырья и поверхностей индивидуумов (кусков, зёрен, крошки) по стадиям измельчения, облегчающего их деформацию и разрушение (в т.ч. переизмельчение!) вследствие обратимого физико-химического воздействия среды. Его негативное последствие – увеличение доли потерь от переизмельчения. Очевидно, что наиболее интенсивно РЭ проявляется при переработке молочно-белого кварца, о чём можно судить по оценкам сырьевых потерь, достигающих 40–60% (табл.1). В качестве одного из способов их снижения можно рассматривать изменение «физики» процесса, например переход от дробления раздавливанием на истирание. Технически (и технологически) это может быть реализовано заменой щековых дробилок с одной подвижной щекой на дробилки с двумя подвижными щеками, а также, возможно, на конусные или валковые.

Одной из используемых на практике характеристик сопротивляемости горных пород (и минералов) технологическому разрушению как известно, является коэффициент крепости  $f$  по шкале проф. Протодьяконова. В первом приближении он пропорционален пределу прочности породы при сжатии ( $\sigma_{сж}$ ). В простейшем случае его величина может быть определена эмпирически по значению  $\sigma_{сж}$ . [19]. Как уже упоминалось выше, основные потери кварцевого сырья связаны с процессами дробления при производстве крупки. Но, по сути, никем из исследователей не приведена классификация сырья различных генетических типов по твёрдости и дробимости. Подобные классификации существуют для руд металлов. Например, по дробимости минеральное сырьё (руда) классифицируется на пять классов: от высшей степени труднодробимого до легкодробимого. Классификация по твёрдости насчитывает девять градаций [19, 23]. Очевидно, что показатели твёрдости и, соответственно, дробимости кварцевого сырья, определяются интенсивностью газонасыщенности, водонасыщенности и примесным составом в виде газовойжидких, твёрдых неструктурных и структурных включений [22]. И.Л. Комовым и М.И. Самойловичем установлены различия в твёрдости кристаллов кварцев, принадлежащих различным генетическим типам [9]. Ими приводится зависимость между температурой образования кварцев и их твёрдостью: наибольшей твёрдостью обладают низкотемпературные кварцы. Последние характеризуются и относительно меньшим примесным составом. Между содержанием элементов-примесей (ЭП) в кристаллическом кварце и твёрдостью также существует определённая связь: при увеличении содержания алюминия (и, соответственно, компенсирующих ионов натрия, лития, водорода) прочностные свойства кристаллов уменьшаются [9]. Мы отнюдь не склонны автоматически переносить приведённые выше авторские оценки зависимостей параметров, свойственных кристаллическому кварцу, на его жильные разновидности, но не исключаем возможных тенденций их существования на эвристическом уровне. Последние замечания приводят к выводу о том, что система признаков пространства, которой обычно оперируют при описании объекта деятельности в «кварцевой отрасли» специфически ограничена. Она, эта система, определяется прежде всего собственно содержанием  $\text{SiO}_2$ , дифференцированными уровнями концентраций элементов-примесей (ЭП) и их суммой ( $\Sigma$  ЭП), а также «природой» (структурные – неструктурные), «структурой» ПИ (стекло, гранулы), показателями газонасыщенности (ГН) или, иначе, содержанием высокотемпературной воды, коэффициентом светопропускания (КСП), оценивающим уровень замутнённости кварцев в зависимости от концентраций ГЖВ. При этом следует подчеркнуть, что связь между отдельными показателями качественных характеристик сырья и качеством производимых продуктов (концентратов) достаточно условна.

Располагая списком более двухсот публикаций, посвящённых геологии месторождений кварцевого сырья и технологии его обогатительного передела, отметим, что, в большинстве своём, эти работы формируют две подсистемы признаков пространства (кварц, кварцевое сырьё, высококремнеземистое сырьё,

кварциты и т.д.) – геохимическую и минералогическую [11]. Вместе с ними, исходя из основной целевой функции, означенной в названии статьи, система «руда», «полезное ископаемое» обязательно должна включать в качестве дополнения подсистемы петрофизики и горного производства [геол. сл.]. Несмотря на кажущуюся исключительную разнородность процессов и описывающих их параметров, формирующих признаковое пространство в целом, эта система должна рассматриваться в качестве интегральной функции, образующей объекты «руда», «полезное ископаемое». Наиболее целесообразно формирование этой системы следует рассмотреть как единый процесс качественного изменения во времени на материале ограниченной выборки индивидуумов (кусков) полезного ископаемого, объединённых в эквивалентную группу условиями эксперимента. В частности, комплекса физико-химического и физико-механического направленного («активного» по В.И. Ревнивцеву) воздействия на минерал (кварц). В реализации эксперимента принимали участие Г.И. Крылова, С.Д. Шмелёв, О.Л. Журавлёва, Н.Г. Порохня, О.В. Савина.

Последовательность выполняемых операций определяется следующим образом:

1. Из трёх партий шихты (жильный кварц мест. Желанного), предназначенных для осуществления перекристаллизации в условиях промышленного производства (гидротермального синтеза) на ростовом оборудовании ВНИИСИМС, были случайным (в статистическом смысле) образом отобраны 18 кусков с размерами по максимальному измерению 50–60 мм.

2. От этих кусков были отобраны сколы, материал которых подвергся измельчению и исследованию в химико-аналитической лаборатории ВНИИСИМС по стандартной схеме определения элементов-примесей. Оценки результатов химических анализов ранее проведённых этой лабораторией фактически подтвердили аналогию соответствия партий шихты 2-му и 3-му сортам ТУ 41 - 07 - 014 - 86 (12 кусков по  $\Sigma$  ЭП отнесены ко 2-му, 3 куску – к 3-му). Заметим, что по принадлежности ко 2-му сорту ТУ оказалась также шихта бразильских месторождений, которая была использована ранее в проведении промышленных циклов, но при стандартизированных параметрах синтеза её растворимость оказалась практически нулевой.

3. После завершения ростовых циклов и съёма продукции из корзин с остатками шихты были отобраны три куски из партий, прошедших весь цикл «гидротермального воздействия», но, тем не менее, визуально не затронутых процессами растворения. Вместе с 4-мя кусками бразильского кварца эти три, при очень близких значениях  $\Sigma$  ЭП, позволяют их включить в исследуемую выборку и формально рассматривать (по этому показателю) в качестве однородной, т.е. эквивалентной.

4. Из опилов синтезированных кристаллов кварца, прошедших разбраковку, были отобраны шесть кусков примерно той же размерности, что и куски шихты жильного кварца. По  $\Sigma$  ЭП эти образцы кристаллического кварца соответствовали 1-му сорту ТУ, отличаясь несколько (в единицах ppm) повышенными содержаниями щелочных ЭП (K, Na, Ca, Li). Формально, как состоящие практически нацело из SiO<sub>2</sub> и имеющие достаточно относительно близкие значения  $\Sigma$  ЭП, а именно в 5–7 раз ниже, чем в шихте (в ppm), их можно рассматривать в исследуемой выборке, как принадлежащие отдельному кластеру.

5. Из объединённой выборки в 34 куска были выпилены пластины, которые подверглись определению петрофизических и физико-механических свойств. Определения были выполнены на кафедре полезных ископаемых рудно-петрографической лаборатории МГУ по методике В.И. Старостина [25, 26] и при его консультационной поддержке. Упругие и акустические характеристики измерялись на установке УЗИС – ЛЭТИ (ультразвуковой измеритель скорости) с последующей обработкой результатов на ВЦ МГУ по стандартным программам. Физико-механические свойства, в частности коэффициент крепости по Протодьяконову  $f$ , определялся путём точечных воздействий и замеров  $\sigma_{сж}$  на дефектометре в лаборатории физических исследований ВНИИСИМС [19].

Таким образом, признаковое пространство было пополнено параметрами, характеризующими упругие свойства кварцев (коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига, модуль всестороннего сжатия, акустическая жёсткость, температура Дебая, плотность) и их сопротивляемость технологическому разрушению (коэффициент крепости  $f$  и категория крепости по Протодьяконову) [19]. Между параметрами, принадлежащими различным подсистемам признакового пространства, как уже упоминалось выше, существует значимая корреляционная связь. Её, очевидно, следует рассматривать как оценку отношений между этими подсистемами на уровне строения дискретных замеров, т.е., в нашем случае, кусков. Это достаточно глубокий уровень детализации системы, определённый технологией расчленения структуры объекта (рудного тела месторождения) до получения аналога полезного компонента (куска).

Под решением задачи классификации кварцев на технологические типы следует понимать установление правил отнесения индивидуумов (кусков) к одной или нескольким группам (типам, категориям) на основании некоторого числа характеристик и построения описания этих групп. Способ решения задачи классификации, как методически оправданный, состоит из нескольких этапов не только с точки зрения формальной их организации, но и с позиций «внутренней», генетической логики:

- отбора из множества признаков, используемых для описания объекта, одного, который должен быть положен в основание классификации (см., например, типизацию кварцев по типоморфным особенностям,  $\Sigma$  ЭП, и т.д.),

- разбиение множества объектов (кусков) на группы в соответствии со значениями данного признака и определением среднего результирующего значения или моды в каждой группе,
- объединение или разбиение групп объектов на подклассы по второму признаку и т.д. в соответствии с градациями первого признака [7].

Отметим основной принцип любой классификации, состоящий из двух положений: а) в один класс объединяются объекты, сходные между собой в некотором смысле; б) степень, уровень сходства между объектами, принадлежащими к одному классу должна быть больше, чем степень сходства у таковых, относимых к разным классам. Понятно, что оптимальность группировки в соответствии с указанным принципом должна быть обеспечена наибольшей однородностью внутри кластеров и сохранять наибольшее различие между ними.

Описанные приёмы относятся к так называемым кластер-процедурам. В алгоритмах кластер-анализа совместно с задачей оптимизации разбиения реализуется идея образования классов по принципу выделения сгущений-участков с наибольшей концентрацией точек в рассматриваемом пространстве (см. рис. 1,2). Под кластерами, таким образом, понимаются группы близко расположенных, тесно связанных друг с другом элементов по значениям комплексов признаков. Введение подобного формального определения сходства (близости) между объектами-элементами множества  $U$ , т.е. кусками кварца, составляющими исследуемую выборку, соответствует заданию в нём некоторой топологии. В связи с последним сформированное признаковое пространство превращается в топологическое.

Для понимания утверждения логичности реализации последующих процедур введём несколько понятий и обозначений. Так множество всех кусков кварца – носителей информации,  $U = \{u_j\}$ , будем считать конечным с объёмом  $N$ . Каждый кусок  $u_j \in U$  обладает числом степеней свободы  $m$ , равным числу признаков, с помощью которых его можно описать. Таким образом этот каждый «кусок»  $u_j$  как элемент множества  $N$ , может быть описан с помощью  $m$ -мерной случайной дискретной величины  $x_j = (x(1), x(2), \dots, x(m))_j$ , при этом под  $x_j(k \in m)$  понимается результат измерения  $k$ -го признака на  $j$ -м куске. Каждый признак  $x_i(k)$  может иметь  $l(k)$  градаций, где под градацией следует понимать  $i$ -й интервал по делящему признаку, внутри которого результирующие значения признаков будем считать эквивалентными (отношение эквивалентности – бинарное отношение, которое рефлексивно, симметрично и транзитивно).

Исходя из ограниченности исследуемой выборки и достаточно высоком уровне изменчивости всех задействованных для её описания параметров, в качестве основного классификационного признака использована температура Дебая ( $\Theta$ ). Объективность выбора объясняется наименьшим уровнем её изменчивости среди всех прочих («геохимических», петрофизических, физико-механических). Это некоторая константа вещества, характеризующая связь между его теплоёмкостью и коэффициентом упругости. Используется в качестве параметра устойчивости структуры [26]. Отклонение расчётных значений температур Дебая от стандартизированных является свидетельством изменённости структуры образца данной литологической или минеральной разновидности (например, фазовому переходу), что, в свою очередь, претендует на генетическую принадлежность этого делящего признака.

Важную роль в реализации процедур играет определение кластера. Назовём точку  $A$  – центр сферы радиуса  $r$  – точкой сгущения типа  $(r, k)$ , если в данную сферу попадает не менее чем  $k$  ( $k > 0$ ) точек. В связи с тем, что сформированное признаковое пространство является пространством с «плохой» структурой, необходимо логическое осмысление процедуры выбора  $r$ . Выше приводилась схема отбора образцов (кусков). Это исключительно «дискретная» процедура, равно как дискретными следует считать замеры всех признаков. На основании последнего, а также в связи с природной изменчивостью в распределении признаков, значительная их часть (а для исследуемой выборки практически все) образует так называемые «размытые» множества (наглядно это видно на рис. 1 и 2), затрудняющие процедуру классификации. Как видно распределение точек в пространстве, определённом парой признаков (температурой Дебая и модулем Юнга, температурой Дебая и удельным волновым сопротивлением) неравномерно по плотности. В алгоритме кластер-анализа, работающего «человекоподобным» образом, находятся более плотные кластеры типа  $(r$  и  $k)$ . Наиболее удобной и оправданной для подобных построений мерой сходства является Евклидово расстояние ( $d_{ij}^2$ ):

$$d_{ij}^2 = \sum_{k=1}^m |x_i(k) - x_j(k)|^2,$$

где  $x_i$ ,  $x_j$  в данном случае могут рассматриваться в качестве координат объектов (признаков), центрированных относительно их средних значений в выделенных совокупностях. В качестве критерия эффективности разбиения процедур кластер-анализа был использован функционал  $I(g)$  [7]. Оптимальным, в смысле разбиения, является приводимый ниже вариант, соответствующий интервалам группирования по основному делящему признаку.

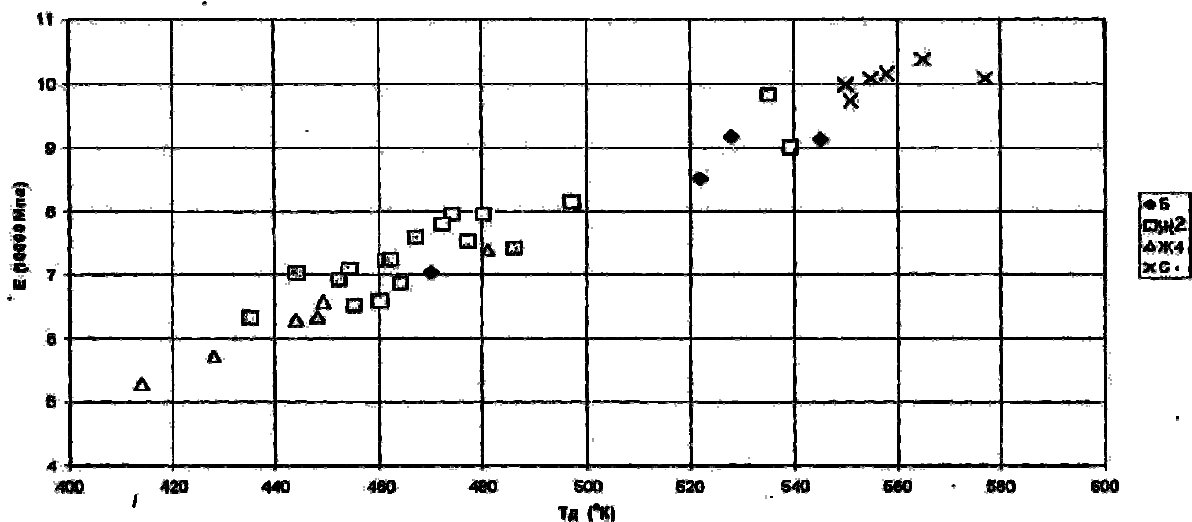


Рис. 1. Точечный график корреляционной зависимости между значениями модуля Юнга (ордината) и температурой Дебая (абсцисса) Б - бразильский кварц; Ж2 - кварц м. Желанное марки КЖ-2; Ж4 - кварц м. Желанное, не соответствующий марке КЖ-3; С - синтетический кварц

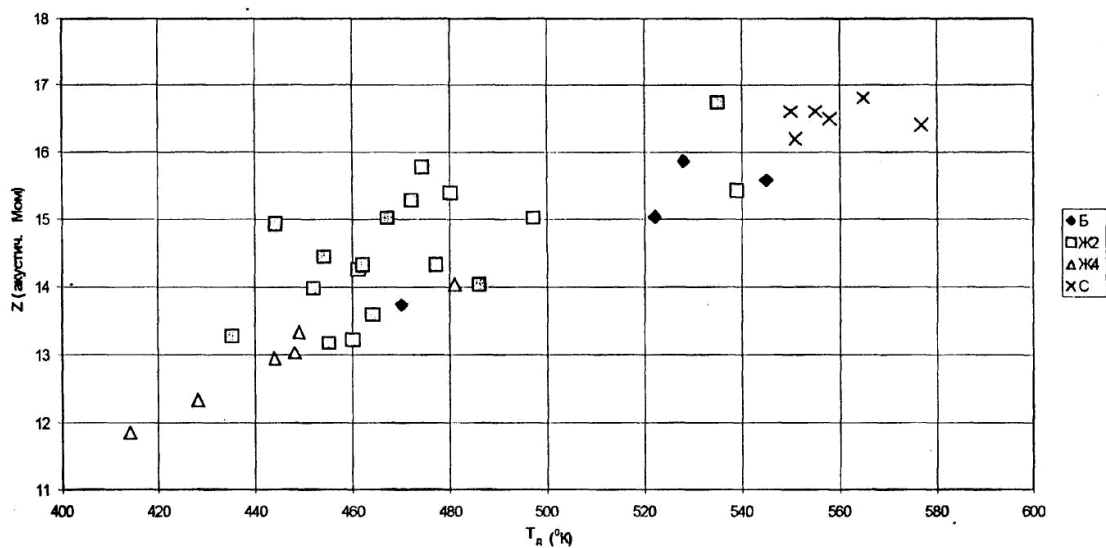


Рис. 2. Точечный график корреляционной зависимости между значениями удельного волнового сопротивления (ордината) и температурой Дебая (абсцисса). Условные обозначения: см. рис.1.

Приводимое в табл. 2 описание типов кварца в куске по совокупности элементов структуры признакового пространства (столбец 10), с соответствующими потенциальными оценками технологичности, следует рассматривать лишь в качестве одного из возможных вариантов геолого-технологической классификации на означенном элементном уровне. Включение в исследуемую выборку кусков из опилов кристаллического кварца имеет под собой следующую аргументацию. Исходным сырьевым материалом (шихтой) для его получения является жильный кварц месторождения Желанное, определённая (значительная) доля (объёмная, весовая) которого при заданных стандартных условиях гидротермального синтеза (РТ) растворяется и переотлагается на затравках.

Процесс реализуемого в автоклаве массопереноса  $\text{SiO}_2$  сопровождается новообразованиями не только в структуре сырьевого продукта с частичной низкотемпературной кристобалитизацией [1], но и значимым (в 5–10 раз) уменьшением концентраций элементов-примесей. Следовательно, гидротермальный синтез может рассматриваться в качестве одной из операций обогатительного передела, по своей природе очень близкой отдельным технологиям гидрометаллургии.

Утилизация отходов производства гидротермального синтеза (опилов, брака) при стандартизированных параметрах процесса оказывается неэффективной из-за ограниченной растворимости перикристаллизованного материала (по сравнению с шихтой жильного кварца). Это является одним из доказательств

«упорности», т.е. повышенной сопротивляемости на внешнее воздействие. Примесный состав ИКК значительно ниже (в 4–5 раз по  $\Sigma$  щелочных ЭП и в 2–3 раза по содержанию Al) по сравнению с жильным кварцем. Очень близки по совокупности значений основных показателей (по  $\Sigma$  ЭП, петрофизическим и физико-механическим свойствам) к синтезированному бразильский кварц и не затронутые растворением разновидностями жильного кварца месторождения Желанного. Незначительные отличия по примесному составу в этой группе имеет бразильский кварц в связи с несколько (1.2–1.5 раза) повышенным содержанием Al. Дальнейшая оценка технологических особенностей кварца типа А была продолжена исходя из предположений о его возможной принадлежности к использованию в виде другого аналога полезного компонента – крупки. С этой целью две группы отходов (опилов) весом 300 и 400 кг были подвергнуты дальнейшему обогатительному переделу, включавшем термодробление, измельчение, классификацию, сепарацию и пр., на одном из заводов г. Гусь Хрустального до получения фракции 0.1–0.4 мм. Химический анализ первой партии крупки показал сравнительно повышенное содержание суммы щелочных ЭП (до 60 ppm). В связи с этим было принято решение изменить тонину измельчения второй партии до фракции 0.1–0.28 (0.25) мм. Содержания суммы щелочных ЭП в этой партии крупки составило 0,4 - 4 ppm, алюминия – 2 ppm. Выход крупки по обеим партиям достигал 80–85%, что, в свою очередь, являлось косвенным доказательством высокого уровня однородности материала по совокупности признаков. По  $\Sigma$  ЭП эта крупка соответствует маркам J5 – J6.

Таблица 2

Вариант геолого-технологической типизации кварцевого концентрата (в куске), используемого в качестве шихты для гидротермального синтеза

| Тип шихты | Параметры                             |  |  |   |   |                                      |  |   | Качественная характеристика и оценка технологичности   |
|-----------|---------------------------------------|--|--|---|---|--------------------------------------|--|---|--|
|           | примесный состав, $n \cdot 10^{-4}\%$ |  |  | петрофизические и физико-механические свойства  |   |                                      |  |   |  |
|           | Сумма ЭП<br>пределы<br>среднее        | В том числе<br>сод. Al<br>пределы<br>среднее | В т. ч.,<br>Эсод.<br>щелочей<br>(K, Na,<br>Ca, Li)<br>пределы<br>среднее | Темп.<br>Дебая,<br>градус<br>пределы<br>среднее | Акусти-<br>ческая<br>жест-<br>кость<br>пределы<br>среднее | Модуль<br>Юнга<br>пределы<br>среднее | Кате-<br>гория<br>крепос-<br>ти по<br>Прото-<br>дья-<br>конову | Козф.<br>крепости<br>по Прото-<br>дья-<br>конову, $f$ |  |
| А         | <u>55–100</u><br>(70)                 | <u>6–36</u><br>(17)                          | <u>40–60</u><br>50   | <u>520–550</u><br>(535)                         | <u>15–17</u><br>(16)                                      | <u>8.5–10</u><br>(9.2)               | I – II   | 19–17   | Шихта кварцевая в куске по шкале проф. Протодьяконова в высшей степени жёсткая, упорная, с близкими к ТУ показателями концентраций элементов-примесей, в частности суммы щелочей и алюминия, с крайне ограниченной растворимостью при $P < 1000$ атм, нетехнологичная для гидротермального синтеза, но пригодная для перевода в крупку и последующего – в стекло повышенной термостойкости.  |
| Б         | <u>40–80</u><br>(50)                  | <u>8–50</u><br>(19.5)                        | <u>30–40</u><br>(35)   | <u>440–500</u><br>(470)                         | <u>13–15.5</u><br>(14)                                    | <u>6.5–8.2</u><br>(7.2)              | II   | 15–12   | Шихта кварцевая в куске по шкале проф. Протодьяконова жёсткая, с относительно пониженными содержаниями элементов-примесей, но с несколько повышенным содержанием алюминия, технологичная для гидротермального синтеза кварца в условиях стандартизированных значений $P, V, T$ , соответствующих типу сосуда.  |
| В         | <u>30–60</u><br>(40)                  | <u>17–30</u><br>(23)                         | <u>20–30</u><br>(25)   | <u>415–435</u><br>(425)                         | <u>12 – 13.5</u><br>(12.5)                                | <u>5.3 – 6.3</u><br>(5.8)            | II – III   | 12 – 10   | Шихта кварцевая в куске, по шкале проф. Протодьяконова крепкая, с соответствующим ТУ уровнем концентраций элементов-примесей, наиболее технологичная для гидротермального синтеза, а технологических отходов – для производства кварцевой крупки, кварцевого стекла, продуктов наплава для волоконной оптики.  |
| Г         | <u>6–11</u><br>(9)                    | <u>1.5–6.8</u><br>(3.8)                      | <u>4–6</u><br>(5)  | <u>550–580</u><br>(565)                         | <u>15.5–17</u><br>(16.5)                                  | <u>9 – 10.5</u><br>(9.9)             | I - II   | 20–18   | Кварц кристаллический синтезированный по шкале проф. Протодьяконова в высшей степени крепкий с ограниченным количеством концентраций элементов-примесей, пригодный для изделий пьезотехники и оптики, технологические отходы и брак производства которого могут быть использованы для получения особо чистой крупки с дальнейшей утилизацией в технологиях особо чистого термостойкого кварцевого стекла и промпродуктов наплава для волоконной оптики |



Эксперименты по оценкам плавочных свойств концентрата из ИКК были проведены на Подольском химико – металлургическом заводе. На основании полученного заключения и проведённых замеров следует, что её температура плавления (Тпл.) на 100–120° С выше аналогичной для стандартной, получаемой из жильного кварца. Термостойкость наплавленного стекла в изделиях (кварцевых тиглях) в 2.5–3 раза выше, чем в подобных, но наплавляемых из крупки, получаемой из жильного кварца путём использования комплекса операций преимущественно механического воздействия на минерал. Выскажем предположение, что подобные технологические особенности присущи также природным, не перекристаллизованным разновидностям кварцев, по совокупности признаков оказавшимися принадлежащим 1-му кластеру (тип А). Очевидно, что природное кварцевое сырьё и выделяемые из него как по размерам фракций, так и по  $\Sigma$  ЭП полезные компоненты, обязаны своей неоднородностью свойств, в первую очередь генетическим факторам, необходимость учёта и количественной оценки которых существует при типизации на технологические типы. Подтверждением этому является отмечаемая отдельными авторами зональность в распределении ЭП. Сюда же следует добавить и мотивацию о том, что полезное ископаемое (жильный кварц) большинства месторождений представляет собой «фазовую кремнезёмную смесь» ( $\alpha$ ,  $\beta$  – кварц, кристобалит, тридимит), сохраняющую элементы структуры её составляющих. Поэтому высказываемые отдельными авторами, в частности В.А. Исаевым [8], предложения по включению кристаболитизационного цикла в схему обогатительного передела, очевидно, не являются обоснованными.

Используя принятые в подобных случаях элементы математического истолкования, связанные, в частности, с процедурами аппроксимации диаграмм (экспериментальных кривых), в общем виде можно утверждать, что для определённой доли полезного ископаемого – жильного кварца – на генетическом уровне и для перекристаллизованного – в гидротермальных условиях – достигнуты «асимптотические пределы» растворимости и плавкости. Их использование в качестве шихты для гидротермального синтеза, включая и опилы ИКК, как концентрата, адекватного типу А, при стандартизованных параметрах процесса нецелесообразно из-за их «упорности». Как упоминалось выше, прослеживается аналогия с растворимостью в оценках технологичности этих кварцев и в плавочных испытаниях, при которых доказана их более высокая термостойкость. Привести «долевою» содержательную оценку типа А в запасах жильного кварца месторождения Желанного на основании крайне ограниченной выборки достаточно сложно. (Напомним, что каменный материал был отобран путём изъятия из остатков шихты отдельных кусков после завершения циклов на основании визуальных просмотров). По сугубо предварительным данным количество таких кусков в остатках разных циклов достигало 10–20%.

Тип Б – кварцевая шихта в куске – по совокупности свойств, определяющих кластер, составляет основную часть выборки (рис. 1, 2) и по объёму достигает 50–60%. Этот тип, за исключением нерастворимых при заданных параметрах синтеза кусков, является основным «технологически оптимальным» сырьевым продуктом для гидротермального синтеза.

Тип В – кварцевая шихта в куске – по набору оценок значений петрофизических и физико-механических свойств обладает наибольшей растворимостью в гидротермальных условиях, но относительно повышенными содержаниями  $\Sigma$  ЭП. Весовая доля кварца этого типа в отдельных партиях шихты при изменениях её сортности (от 1-го к 3-му) может колебаться от 20 до 30%, что, в свою очередь, сказывается на качестве кристаллического кварца и его эксплуатационных характеристиках.

Тип Г – это кристаллический кварц, особо чистый, рафинированный, прошедший перекристаллизацию и очистку, по сути своей – сырьевой полуфабрикат для использования в наукоёмких производствах радиотехники, электроники, акустоэлектроники, а также потенциальный промежуточный продукт для волоконной оптики и кристаллического кремния.

Таким образом на основании результатов исследований на ограниченной выборке каменного материала – кварца в куске, предназначенного к использованию в качестве шихты при гидротермальном синтезе, полученных выделением дополнительных, по сравнению с общепринятыми, замеров петрофизических и физико-механических свойств, доказана возможность увеличения признакового пространства. При его обработке, с привлечением элементов кластерного анализа, получено мотивированное заключение о реальности существования в весовых партиях поставляемого для производственных нужд (синтеза) кварцевого концентрата в куске из жильного кварца месторождения Желанного, как минимум трёх технологических типов сырья. Предложен вариант примера типизации концентрата с дифференцированными оценками потенциальных направлений использования промышленностью, но при этом следует подчеркнуть, что все построения и их аргументация приведены на «уровне строения кварцевого куска» т.е. концентрата [28, 29]. Разумеется, что ни о каком переносе приводимых цифр на запасы жильного кварца месторождения в целом здесь не может иметь места. Тем не менее можно с достаточной долей уверенности утверждать, что существующие методы оценки ресурсной базы кварцевых объектов следует считать значительно упрощёнными как по самой процедуре, так и по информационной ограниченности. Действительно, например, если в подсчётах исходить из нескольких обобщённых понятий содержаний «жильного кварца в сырьё», то «выемочная стоимость» этих запасов будет минимальной [30]. Но совершенно иная оценка будет, если оперировать средними содержаниями концентратов (кусок, крупка) или, что не так уж и абсурдно, содержаниями кремния [21].

Нужны дополнительные ассигнования на разведку, в частности – на опробование [3], разработку технологий обогащения, апробацию утилизационных процессов, аналитические исследования и пр., т.е. реализацию всех тех процедур, которые включает геологоразведочный процесс на рудных месторождениях металлов [22]. Необходимое условие этой реализации – создание специализированного современного предприятия, типа холдинга, с функциями управления сырьевой базой, правом принятия решений по формированию и учёту распределения, а также целенаправленного использования сырьевых потоков. В противном случае санкции и предложения по созданию, развитию, внедрению ресурсосберегающих технологий не будут иметь реально-го развития.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балакирев В.Г. Мельников Е.И. Электронно-микроскопическая фрактография кварца. М.: Недра, 1991. 120 с.
2. Быховский Л.З., Машковцев Г.А., Самсонов Б.Г., Эштейн Е.М. Рациональное использование недр – основной путь повышения качества и конкурентноспособности минерально-сырьевой базы России // Руды и металлы. 1996. Вып. 6. С. 5–12.
3. Временная инструкция по применению методики малообъёмного технологического опробования и картирования месторождений. ВИМС, Механобр. 1974.
4. Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца // Под редакцией Е.П. Мельникова. М.: Недра, 1988. 216 с.
5. Государственный кадастр месторождений и проявлений полезных ископаемых СССР. Инструкция по ведению кадастра и методическое руководство по составлению паспортов. – М.: Союзгеолфонд, 1981.
6. Евстропов А.А., Бурьян Ю.И., Кухарь Н.С., Серых Н.М., Цюцкий С.С. Жильный кварц Урала в науке и технике. Геология основных месторождений кварцевого сырья. М.: Недра, 1995. 207 с.
7. Елисеев И.И., Рукавишников В.О. Группировка, корреляция, распознавание образов (статистические методы классификации и измерения связей). М.: Статистика, 1977.
8. Исаев В.А. Физико-техническое обоснование новой технологии переработки непрозрачных разновидностей кварца // Горный инф.-аналит. бюлл. 1997. № 5. С. 95–102.
9. Комов И.Л., Самойлович М.И. Природный кварц и его физико-механические свойства. М.: Недра, 1985. 124 с.
10. Краткие тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции по кварцевому стеклу. Л., 1983, М., 1983, 166 с.
11. Крылова Г.И. Влияние флюидных режимов на специализацию и качество кварцевого сырья // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях // Тез. докл. межд. симп., посв. 100-летию со дня рожд. акад. А.Г. Бетехтина. М., 1997. С. 49–50.
12. Крылова Г.И., Морохов В.А. Теоретические предпосылки использования попутного или нетрадиционного высококремнеземистого сырья // Мат. межд. н.-техн. конф. - Екатеринбург, 1999. С. 24–25.
13. Крылова Г.И., Морохов В.А., Ярмак М.Ф., Турашева А.В., Шмелёв С.Д. Геологические, технологические и экономические проблемы получения высококачественных кварцевых продуктов // Геологическая служба и минерально-сырьевая база России на пороге XXI века: тез. докл. н.-практ. геол. конф. СПб, 2000.
14. Мамаев Ю., Котилко В. Российская оптика может перестать работать на безопасность страны // Фин. изв. 1996. № 104 (338).
15. Менчинский В.В., Ташкер Э.М. О комплексной оценке месторождений кварцевого сырья. Прогнозирование, поиски и оценка месторождений пьезооптического минерального сырья. Метод рек. М., 1975. С. 100–107.
16. Научно-технический прогресс в области производства кварцевого стекла и изделий на его основе // Сб. тр. Минстроймат. М.: изд. НПО «Кварц», 1988. 147 с.
17. Отраслевая инструкция по определению, учёту, экономической оценке и нормированию потерь жильного кварца при добыче на месторождениях, разрабатываемых ВПО «Союзкварсамоцветы» Мингео СССР. М., 1982.
18. Повышение эффективности научно-исследовательских и геологоразведочных работ по обеспечению промышленности дефицитным особо чистым кварцевым сырьём // Тез. Всес. сем. М.: изд. ВИЭМС, 1989. 90 с.
19. Ржевский В.В., Новак Г.Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1984.
20. Роль технологической минералогии в расширении сырьевой базы СССР // Тез. докл. Всес. конф. Челябинск, 1986. 185 с.
21. Сборник законодательных и нормативных актов о недрах. М.: изд. АО «Геобиржа», 1993. Вып. 1.
22. Совершенствование технологии и аппаратуры для переработки жильного кварца // Тез. докл. сем. - г. Кыштым, 1988. Ч. I. 163 с. Ч. II. 266 с.; ч. III. 72 с.
23. Справочник по обогащению руд. М.: Недра, 1983.
24. Становление и развитие отечественной науки и технологии кварцевого стекла // Сб. тр. МПСМ и НПО «Кварц». Л., 1989. 112 с.
25. Старостин В.И., Дергачёв А.Л., Хркович К. Структурно-петрофизический анализ месторождений полезных ископаемых. Уч. пос. М.: изд. МГУ, 1994. 288 с.
26. Старостин В.И. Структурно-петрофизический анализ эндогенных рудных полей. М.: Недра, 1979.
27. Ташкер Э.М. Методические рекомендации по оценке качества кварцевого сырья для плавки и оптического стекловарения. М., 1983. 68 с.
28. ТУ 5726 – 002 – 11496665 – 97. Технические условия. Кварцевые концентраты из природного кварцевого сырья для наплава кварцевых стёкол. М., 1997. 25 с.
29. ТУ 5726 – 001 – 11496665 – 97. Технические условия. Кварцевые концентраты из природного кварца для оптического стекловарения. М., 1997. 8 с.
30. Шатнов Ю.А., Ярмак М.Ф. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы горного хрусталя и жильного кварца России // Тр. ВНИИСИМС. Александров, 1997. Т. XIV. С. 506–512.