

16. *Индутный В.В., Пирогов Б.И.* Опыт количественной оценки онтогенической характеристики руд Кривого Рога // ЗВМО. 1990. Ч. 119. Вып. 4. С.94-99.
17. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
18. *Ревнивцев В.И.* Рудоподготовка как новое направление горных наук // Основные направления развития техники и технологии обогащения ПИ. Л., 1983. С. 3-22.
19. *Дымкин А.М., Пермьяков А.А.* Онтогения магнетита. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 188 с.
20. *Куштаренко Ю.С.* Минералогическая технология – новое направление изучения вещественного состава минерального сырья. М.: РИЦ «ВИМС»а, 1997. 40 с.
21. *Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П.* и др. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.
22. *Ревнивцев В.И., Доливо-Добровольская Г.И., Владимиров П.С.* Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1993. 248 с.
23. *Шмакин Б.М., Коваль П.В.* Экологическая минералогия: содержание, методы и место в обогатительном процессе. // Роль минералог. исслед. в решении эколог. проблем (теория, практика, перспективы развития). СПб.: Мин. об-во при РАН, 2002. С.195-196.
24. *Юргенсон Г.А.* Проблемы минералогии геотехногенеза // Роль минералог. исслед. в решении эколог. проблем (теория, практика, перспективы развития). СПб.: Мин. об-во при РАН, 2002. С. 200-203.
25. *Дементьева Г.И., Смирнов Ю.М.* Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе // Обогащение руд. 1988. № 3. С. 34-37.
26. *Юшкин Н.П.* Наноминералогия: объекты, функции, перспективы // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. С. 20.
27. *Туресебеков А.Х., Конеев Р.И., Каширский С.А., Ахмедов А.М.* Дискретное состояние вещества в рудных и техногенных системах // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. С. 174-175.
28. *Конеев Р.И.* Наноминералогия золота. СПб.: DELTA, 2006. 220 с.
29. *Щитцов В.В.* Технологическая минералогия промышленных минералов Карелии // Минералогия, петрология и минерагения докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. С. 119-123.
30. *Остащенко Б. А.* Направленное изменение технологических свойств минералов // Автореф. докт. дис. Сыктывкар: ИГ Коми науч. Центра УрО РАН, 1998. 43 с.
31. *Котова О.Б.* Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 194 с.
32. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых // Плаксинские чтения. М.: Альтекс, 2003. 145 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ И МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД МИКРОСКОПОМ

Войтеховский Ю.Л.

ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты

Знание модального состава горной породы или руды весьма важно для решения петрологических и минералого-технологических вопросов. Некогда велись весьма ожесточенные дискуссии о том, какие виды анализа (геометрические под микроскопом или количественно-минералогические с дроблением горной породы и разделением фаз комплексом методов) быстрее ведут к цели и дают более точный результат [1]. Истина оказалась посередине – у каждого подхода нашлись достоинства и недостатки общего порядка и, в особенности, применительно к конкретным горным породам и рудам с их огромным диапазоном составов и структурно-текстурных характеристик. В данной статье коротко обсуждаются истоки модального анализа горных пород под микроскопом, его математические основания и перспективы.

Сегодня модальный анализ горных пород под микроскопом выполняется с помощью анализаторов изображений, в состав которых входят компьютерные системы. Вот наиболее удачные из них: Magiscan, Quantimet, Videolab, System III, Vids II (Великобритания), Videoplan, IBAS, Leitz TAS Plus (ФРГ), Omnimet (ФРГ-США), Pericolor (Франция), Omega (Польша), Robotron (ГДР). Отечественные производители поставляли анализаторы: Свит (ИКИ РАН – Дезинтегратор), Video-Master (ООО “НВП Центр ЭСТАгео”) и МИУ-5м (ЛОМО ЦКБ). Этот немалый список создает иллюзию благополучия и прогресса. Но в рассматриваемом нами аспекте ситуация мало изменилась со времен создания метода. Еще раз подчеркнем, что имеющиеся компьютерные системы позволяют охарактеризовать изображение различными параметрами, мгновенно выполнить сложные математические пересчеты и вывести результаты на печать. Но фундаментальный вопрос состоит в том, насколько характеристики двумерных или одномерных сечений минеральных зерен соответствуют искомым характеристикам реальных зерен для производной горной породы (рис. 1).

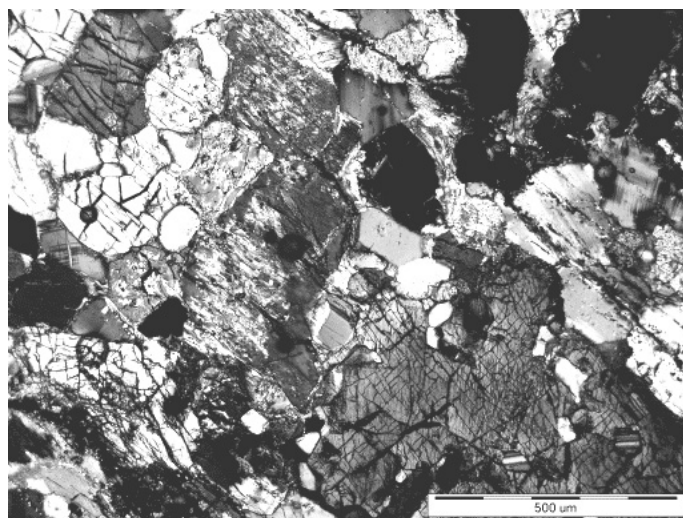


Рис. 1. Сечение горной породы (в данном случае ее петрографический тип не важен). Вопрос состоит в том, в какой мере метрические параметры сечений отвечают таковым самих зерен.

В методе Делесса [2] утверждается, что объемные доли n породообразующих фаз равны их площадным долям в плоских сечениях, измеренным так или иначе: $dV_1 : dV_2 : \dots : dV_n = dS_1 : dS_2 : \dots : dS_n$. Делесс опробовал свой метод на макроскопических образцах, Солла (W.J. Sollas, 1887-1892) – на зарисовках петрографических шлифов, Джоли (J. Joly, 1903-1905) – на их микрофотографиях. Обоснование метода выполнено в целом корректно. Делесс рассуждал так. Пусть образец горной породы соотносен с прямоугольной декартовой системой координат XYZ. Обозначим $p(z)$ площадь некоторой минеральной фазы в плоскости, непрерывно скользящей вдоль Z. Тогда объем фазы в образце равен: $V = \int p(z)dz$. В силу естественных причин площадь $p(z)$ заключена между минимумом m и максимумом M . Поэтому $mZ < V < MZ$, где Z – высота образца. Для случая, когда $p(z) = \text{const} = p$, объем фазы в образце равен pZ – объему цилиндра с основанием p и высотой Z . То же верно для любой другой фазы, из чего сразу следует приведенное выше соотношение, означающее по сути, что отношение объемов цилиндров с равными высотами равно отношению площадей их оснований. Итак, главное условие, на котором стоит метод, $p(z) = \text{const}$. По Делессу, оно должно соблюдаться для “достаточно больших” сечений образца тем точнее, чем равномернее фаза распределена в горной породе.

Легко видеть, что на практике эти условия не соблюдаются. Варьирующие в широком диапазоне площадные доли минеральных фаз обычно суммируются для “достаточно большого” числа шлифов (разных по площади и потому имеющих разный “вес” в статистической совокупности) и принимаются за объемные доли. Эта процедура не имеет отношения к методу Делесса ни в случае, когда каждый новый шлиф принимается за последовательное сечение образца, скользящее вдоль Z, ни тогда, когда все шлифы в совокупности представляются его единым сечением. На практике обычно $p(z) \neq \text{const}$. Влияние этого обстоятельства на точность метода изучалось многими авторами уже на заре его применения [3, 4].

Акер (A. Haquet. Modification de l'appareil de Shand et son employ dans l'analyse mineralogique quantitative des roches meubles. Liege, 1929. Цит. по [5, с. 15-16]) обосновал метод Делесса ссылкой на принцип Кавальери. В работе “Geometria Indivisibilium continuorum nova quadam ratione promota” (1635) (Геометрия, изложенная новым способом при помощи неделимых непрерывного. М.-Л.: Гостехиздат, 1940. Цит. по [6]) Кавальери развил “метод неделимых” определения площадей и объемов. Неделимыми он назвал параллельные хорды плоской фигуры или плоские сечения трехмерной фигуры и ввел понятие “суммы всех неделимых” внутри контура фигуры, ставшее зародышевой формой определенного интеграла. Принцип Кавальери формулируется следующим образом: *если при пересечении двух тел плоскостью, параллельной некоторой ранее заданной плоскости, получают сечения равной площади, то объемы тел равны между собой*. Это положение (и аналогичное ему для плоских фигур) было известно древнегреческим математикам, и Кавальери, строго говоря, его доказывает, а не принимает как принцип. Труды Кавальери сыграли большую роль в развитии интегрального исчисления. Но в целом оно пошло по более плодотворному пути разложения величины на элементарные части того же измерения. Неправильный шаг Кавальери состоял в рассмотрении плоской фигуры как суммы *конечного числа* узких прямоугольных полосок, а трехмерной фигуры как суммы *конечного числа* цилиндрических пластинок вместо рассмотрения их как *пределов* указанных сумм [7-10].

Автор статьи встречал рассуждения коллег, пользующихся методом Делесса, почти повторяющие историческую ошибку Кавальери: “Поскольку петрографический шлиф весьма тонок, то различием сечений минерального зерна на его двух сторонах можно пренебречь. Тогда объем зерна в теле шлифа определится как объем цилиндра с высотой, равной толщине шлифа, а отношения объемов нескольких зерен – как отношения площадей оснований, то есть сечений, что и требовалось доказать. А если это верно для одного шлифа, то верно и для других...” Суть софизма кроется в мелочах, которыми предлагается пренебречь. Действительно, *конечная сумма бесконечно*

малых величин тоже бесконечно мала. Но объем тела есть интеграл, то есть общий предел верхней и нижней сумм Дарбу, которые суть *суммы бесконечно большого числа бесконечно малых величин* – ими пренебречь уже нельзя.

Через 50 лет после Делесса, Розиваль повторил его рассуждение, понизив на 1 размерность пространства. “В соответствии с принципом Делесса, объем содержащихся в породе составных частей сведен к площади их сечений. Но в соответствии с простыми фундаментальными положениями аналитической геометрии она может быть далее определена с помощью простой суммы длин, если исходить из тех же соображений, которые руководили Делессом, когда он предпринял редукцию объемного отношения к площадному. Итак, мы видим, что в методе Делесса в качестве подлежащего измерению элемента тела фактически служит материальная поверхность, очень малая толщина dz которой может считаться постоянной. Такую материальную поверхность представляет собой всякий прозрачный шлиф, если он был изготовлен столь тонким, что все подлежащие измерению составные части породы фактически пересекаются его двумя, лишь на несколько сотых долей миллиметра отстоящими друг от друга параллельными плоскостями. Вместо этой материальной поверхности в качестве подлежащего измерению элемента я теперь беру материальную линию, поперечный размер которой теоретически выражается бесконечно малой величиной $dydz$, которую следует рассматривать постоянной и конечные отрезки которой $x_1, x_2, x_3 \dots$ дают нам меру относительного количества минеральных компонентов в породе. Таким образом, вместо породного листа Делесса является породная нить, в высшей степени тонкая призма, приблизительно сравнимая с чрезвычайно тонким керном скважины, подобно измеряющему зонду пронзающая породу и в линейных долях ее составных частей сообщая нам об их объемных долях в самой породе.

Эту измерительную материальную линию, состоящую из отдельных однородных отрезков внутри пересекаемых минеральных зерен, я называю количественной индикатрисой. В отношении суммы длин сечений, приходящихся на определенный минерал, к ее общей длине одновременно выражается и объемная доля минерала в породе, при этом расчет отношения редуцируется из третьего измерения прямо в первое” [11, здесь и далее пер. с нем. автора].

Таким образом, к методу Розиваля следовало бы сделать те же замечания, что и к методу Делесса. Но важной особенностью работы [11] является попытка разобраться в вопросах о характере индикатрисы. Так, сделана важная оговорка о том, что индикатриса не обязана быть серией параллельных равноотстоящих линий (рис. 2, слева), но может иметь вид пилообразных (рис. 2, справа) или даже хаотических (рис. 3, слева) кривых, равномерно покрывающих плоскость шлифа. Насколько известно автору, последние два вида индикатрис не реализованы в современных анализаторах структур. Следующее рассуждение показывает, как Розиваль оценивал суммарную длину индикатрисы для достижения требуемой точности измерения под микроскопом. “Нетрудно адаптировать метод для микроскопических исследований, при этом следует предусмотреть лишь некоторые правила предосторожности, для микроскопистов понятные сами собой.

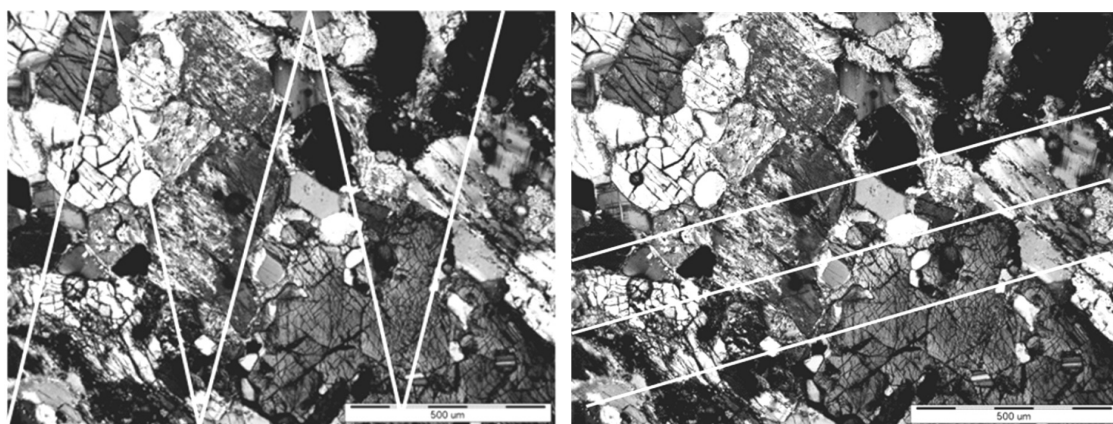


Рис. 2. Параллельная (слева) и пилообразная (справа) индикатрисы

Если в прозрачных шлифах нужно изучить грубозернистую породу, то следует обратить внимание на то, что одного шлифа нормального размера (около 2×2 см) для точного расчета соотношения ее составных частей обычно мало. Для измерения с точностью в 1 % размер зерна в 5 мм требует длины индикатрисы по крайней мере в 500 мм. Расстояние между двумя соседними отрезками системы индикатрис в любом случае должно быть не менее размера зерна, иначе в расчет дважды попадут те же самые индивиды, чего следует избегать. Размер шлифа в этом случае допускает только систему индикатрис из 4×4 , в лучшем случае 5×5 линейных пересечений по 2 см, то есть от 320 до 500 мм суммарной длины, что находится на пределе требуемой точности и представляется недостаточным. Поэтому здесь необходимо измерение второго шлифа и желательно – третьего для контроля за равномерностью распределения составных частей.

Но для характеристики однородной мелкозернистой породы одного шлифа уже достаточно, так как число возможных линий индикатрисы с уменьшением размера зерен возрастает и, например, для зерен в 1 мм в нормальном шлифе помещается сеть из $20 \times 20 = 400$ сечений по 20 мм длиной, итого в целом 8000 мм, в то время как точность измерения в 1 % требует индикатрисы длиной лишь в 100 мм. В этом случае для измерения достаточно 5-6 линий по 20 мм, произвольно расположенных на площади шлифа. При еще меньшем размере зерен требуемая длина линии уменьшается еще более” [11, с. 162-163].

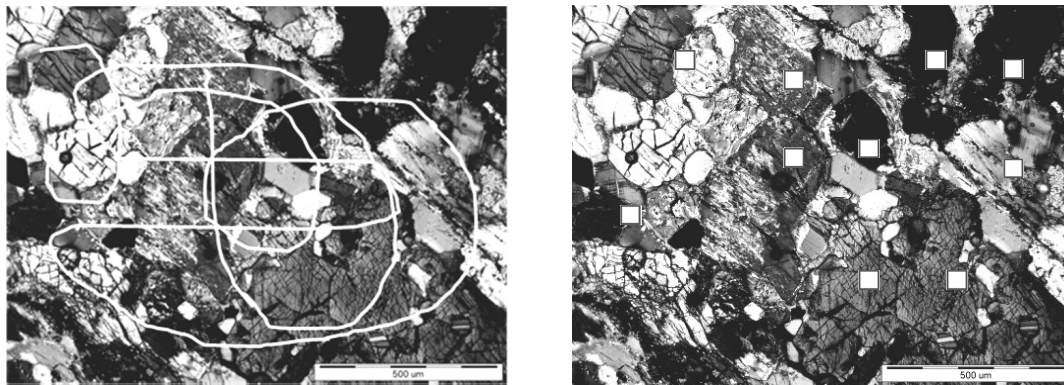


Рис. 3. Хаотическая индикатриса, по Розивалю (слева), и точечный метод, по Глаголеву (справа)

Следующий концептуальный шаг в развитии метода сделал А.А. Глаголев [3, 5]. По сути, он снова уменьшил на 1 размерность пространства, превратив индикатрису, по Розивалю, в систему точек. “Точечный метод заключается в том, что в некотором плоском сечении анализируемой горной породы распределяют большое число точек и затем подсчитывают, какое число точек из общего числа попало на зерна каждого из компонентов горной породы. Под словом “равномерно” подразумевается такое распределение точек, при котором вероятно попадание одинакового числа точек в одинаковые по размерам части пространства, где бы они не находились, или, иначе, такое распределение, при котором не было бы закономерного сгущения или разрежения точек. Равномерное (в этом статистическом смысле) распределение точек в сечении породы не противоречит их беспорядочному расположению” [5, с. 78] (рис. 3, справа).

Показателен интерес А.А. Глаголева к вопросам точности оценок модального состава горной породы под микроскопом всеми тремя методами. “Автор вполне сознает недостаточную полноту своей работы и слабость ее математической обработки, в особенности раздела “Влияние структуры”...” [3, с. 5]. “Точность в определении состава породы определяется числом обчисленных зерен. То есть, если в шлифе есть всего n зерен, то точность в определении состава породы соответствует числу n . Главное – зацепить все зерна, то есть проводить линии сканирования на расстоянии среднего поперечника зерна. Если же проводить линии чаще, то мы увеличим точность определения состава шлифа, но ответ будет равновероятен с предыдущим и определяться тем же n . В.Н. Лодочников и В.А. Николаев как раз и путали одно и второе, рекомендуя сгущать линии.” [там же, с. 22]. “Поскольку точность определения состава породы соответствует числу зерен, то при числе точек, равном числу зерен, точечный метод достигает максимальной возможной точности и линейный и плоскостной методы не могут ничего добавить” [там же, с. 29]. По-видимому, А.А. Глаголев был первым среди российских авторов, кто разработал систему формул для определения погрешностей метода Делесса-Розиваля-Глаголева при анализе горных пород с различными структурами.

Приведенный исторический обзор подводит к следующим выводам. (1) Делесс вполне корректно установил, что объем минеральной фазы в образце заключен между mZ и MZ , и чем ближе m к M , тем точнее оценка объема. Сказанное верно и для оценок, выполненных по Розивалю и Глаголеву. Ссылка на принцип Кавальери в обоснованиях методов Делесса и Розиваля неуместна: во-первых, потому, что приводит к исторической ошибке самого Кавальери (см. выше) и, во-вторых, потому, что требование Кавальери о равенстве (или пропорциональности) суммарных площадей сечений различных минералов от шлифа к шлифу никогда не выполняется [3]. Последнее обстоятельство неизбежно привело к исследованиям форм тел по их сечениям и созданию нового междисциплинарного направления – стереологического анализа.

По-видимому, среди российских авторов за решение задач такого рода первым взялся А.М. Журавский. “Работа проф. А.М. Журавского является новой формой приложения метода исчисления вероятностей к задаче определения минералогического строения ископаемых по данным микроскопического анализа шлифов. Эта задача имеет огромное значение как для механической или химической обработки ископаемых, так и для познания их генезиса и свойств... Возникает вопрос, в какой мере изучение шлифа, измерение содержания компонента и размера зерен по шлифу или ряду шлифов дают право судить об истинном содержании в породе компонентов, истинном размере зерен и расстоянии между ними. Шлиф есть случайный плоский разрез породы. Поэтому представляется естественным приложить к изучению поставленного вопроса, к оценке результатов измерений по шлифам методы изучения случайных явлений, т.е. обратиться к исчислению вероятностей” [12, с. 3-5]. Но рассмотрение методов и главных результатов стереологического анализа требует отдельной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чирвинский И.Н.* Очередная задача современной петрографии в связи с вопросом о способах определять количественно минералогический состав горных пород // Зап. Уральского общества любителей естествознания. 1908. Т. XXVIII. С. 1-38. [Отдельный оттиск этой статьи найден автором в личном фонде акад. А.Е. Ферсмана библиотеки Кольского НЦ РАН. Интересно знать, что и эта тема была в его поле зрения.]

2. *Delesse M.* Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. // Annales des mines. De mémoires sur l'exploitation des mines. Quatrième série. Tome XIII. Paris: Carilian-Goeury et Dalmont, 1848. P. 379-388. [См. рус. перевод: Ю.Л. Войтеховский (сост. и ред.). Горная порода: опыты постижения. Апатиты: Изд-во К & М, 2005. С. 148-154.]
3. *Глаголев А.А.* О геометрических методах количественного минералогического анализа горных пород. Тр. ИПМ. № 59. М.-Л.: Госгеоллиздат, 1933. 47 с.
4. *Teuscher E.O.* Methodisches zur quantitativen Strukturgliederung körniger Gesteine // Sonderdruck aus "Mineralogische und Petrographische Mitteilungen". 1933. Bd. 44, H. 5, S. 410-421. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H. in Leipzig. 1933. Nr. 329. [Отдельный оттиск этой статьи также найден автором в личном фонде акад. А.Е. Ферсмана библиотеки Кольского НЦ РАН.]
5. *Глаголев А.А.* Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом. М.-Л.: Госгеоллиздат, 1941. 263 с.
6. *Кларнер Д.А.* (ред.) Математический цветник. М.: Мир, 1983. С. 487.
7. The Encyclopedia Americana. V. 6. New York, Chicago: Americana Corp., 1944. P. 137.
8. *Зворыкин А.А.* (отв. ред.) Биографический словарь деятелей естествознания и техники. Т. 1. М.: Гос. научн. изд-во "БСЭ", 1958. С. 385.
9. *Прохоров А.М.* (гл. ред.) Большая советская энциклопедия. М.: Изд-во "Сов. энцикл.", 1973. С. 109.
10. *Говард И.* Нарезьте потоньше // Математический цветник. М.: Мир, 1983. С. 130-143.
11. *Rosival A.* Über geometrische Gesteinanalysen. Ein einfacher Weg zur ziffermässigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandtheile gemengter Gesteine // Verhandlungen der kaiserlich-königlichen Geologischen Reichsanstalt. Wien: Verlag der k. k. Geologischen Reichsanstalt, 1898. S. 143-175. [См. рус. перевод: Ю.Л. Войтеховский (сост. и ред.). Горная порода: опыты постижения. Апатиты: Изд-во К & М, 2005. С. 155-165.]
12. *Журавский А.М.* Минералогический анализ шлифа с точки зрения вероятностей // Отдельный оттиск. Материалы по обогащению полезных ископаемых. М.-Л.: Госгеоллиздат, 1932. 20 с.

СПОСОБЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ)

Щипцов В.В.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

Вводная часть

Геологические факторы и типоморфизм минералов являются связующим звеном при определении технологических свойств руд. В основу создания технологических схем обогащения закладываются результаты геолого-минералогических исследований, т.е. методы технологической минералогии. В.М. Изюитко [1] выделила две группы геолого-минералогических факторов, определяющих прямо или косвенно переработку руд металлов. К факторам первой группы относятся минеральный и химический составы, структурно-текстурные особенности, физические и механические свойства рудных проявлений. К факторам второй группы она отнесла геологические характеристики рудных месторождений и проявлений.

В сборнике по материалам Второго российского семинара по технологической минералогии достаточно емкое определение дано Б.И. Пироговым, в котором он подчеркнул, что «технологическая минералогия объединяет минералогические и технологические исследования, связанные с изучением вещественного состава, текстурно-структурных признаков полезных ископаемых, технологических свойств минералов эволюции единой геолого-технологической системы на макро-, микро, наноуровне, направленное на комплексное использование минерального сырья при разработке экологически чистых схем обогащения» [2, стр. 6].

Показано, что эти факторы и типоморфные свойства двух порядков в полной мере применимы и к индустриальным (промышленным) минералам (ИМ) [3, 4]. Образование руд ИМ имеет тесную зависимость от литологического, магматического, структурного и метаморфического факторов контроля. Процессы петрогенезиса, повлиявшие на химический и минеральный состав горных пород Карельского региона, в значительной мере связаны с метаморфизмом горных пород магматического и осадочного происхождения, а также полиметаморфизмом самих метаморфических пород, что является характерной особенностью докембрия Карелии. Меняющиеся термодинамические условия образования горных пород и их минеральных компонентов определили минеральные метаморфические и метасоматические фации и субфации, что в свою очередь повлияло на многообразие и специфику ИМ в количественном и качественном отношении, сформировав природную геолого-технологическую систему. На приводимой РТ-схеме соотношений между метаморфическими фациями и субфациями (рис. 1) основные области формирования ИМ Карелии занимают поля III – V. Наибольший продуктивный вклад в их формирование оказали условия, соответствующие таким типам метаморфизма докембрия Карелии, как кианитовый (беломорский) и высокобарический кианит-сил-