ISSN 0135-3500. Зап.Санкт-Петербургского горного ин-та. 1993. Том 137

УДК 552.124.2/321.5(470.21)

Ю.Л.ВОЙТЕХОВСКИЙ

К МЕТОДИКЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЛАТИНОНОСНОСТИ ПОРОД ФЕДОРОВО-ПАНСКОГО ИНТРУЗИВА ПО ХАРАКТЕРУ ИХ ОРГАНИЗАЦИИ

На основании авторской теоретико-множественной концепции сложного минерального агрегата предложен статистический метод анализа организации горных пород. Пониженные энтропии распределений координаций и разнотипных контактов минеральных зерен в платиноносных габбро-норитах Федорово-Панского интрузива указывают на их более высокую структурированность по сравнению с безрудными аналогами. Это следует учитывать при выделении наиболее перспективных горизонтов в монотонном разрезе интрузива.

Федорово-Панские тундры являются на Кольском полуострове одним из крупнейших базитовых интрузивов, имеющих сульфидную медно-никелевую и оксидную железо-титановую специализацию. Геологическое строение и петрология интрузива изложены в работах [7,8], где дано отрицательное заключение о его промышленном потенциале на указанные типы руд, по крайней мере, до глубины 500 м. Однако работами последних лет установлено, что с точки зрения геохимического накопления элементов оруденение Федорово-Панских тундр следует считать в первую очередь платинометальным, с попутной медно-никелевой и железо-титановой минерализацией [3], обычно совмещенными пространственно. В связи с его комплексным характером перспективы объекта в настоящее время пересматриваются.

По залеганию в разрезе интрузива и минералого-геохимическим особенностям выделены два типа платинометального оруденения: нижний расслоенный горизонт, расположенный на удалении 0,5-1,0 км от контакта интрузива с щелочными гранитами и прослеженный в виде прерывистых слоев и линз на протяжении более 10 км, и эндоконтактовое оруденение. По существующей классификации оба они относятся к типу рифа Меренского с существенно более низким, особенно для эндоконтактового оруденения, накоплением платиноидов. Их более полная характеристика дана в работе [3]. Для целей данной статьи существенно подчеркнуть следующее.

Нижний расслоенный горизонт сложен чередующимися габбро-норитами, норитами, габбро, плагиоклазитами. Кроме того, для каждого из видов пород выделяются структурно-текстурные разновидности. Это отличает горизонт от перекрывающих и подстилающих его монотонных толщ, петрографическое расчленение которых крайне затруднено. Платинометальное оруденение в нижнем расслоенном горизонте тяготеет к шлировым разновидностям габбро-норитов. Аналогично эндоконтактовое оруденение локализовано в шлировых норитах. Сопутствующее медно-никелевое и железо-титановое оруденение в обоих случаях распределено край-

не неравномерно в виде гнездовой вкрапленности. Таким образом, неоднородность, дифференцированность в строении интрузива сразу на трех иерархических уровнях – геолого-структурном, петрографическом и геохимическом – выступает признаком его потенциальной рудоносности.

В данной статье обсуждается петрографический аспект признака. Проблема его использования на этом уровне состоит в том, что структурная неоднородность пород макроскопически часто едва различима. В этих случаях для расчленения монотонных толщ и локального прогнозирования наиболее перспективных частей разреза желательно было бы иметь более чувствительный количественный метод анализа организации горных пород на уровне межзерновых отношений. Решение проблемы затруднено тем, что пока не существует общей концепции сложного минерального агрегата (горной породы), предлагающей способ измерения его организации. Другими словами, не ясно, что и как следует измерять в агрегате. Существующие представления сводятся к тому, что минеральный агрегат – топологически связная совокупность минеральных зерен, а его структурная характеристика – совокупная характеристика зерен главным образом в отношении их форм, размеров и пространственных соотношений. Последние наполняют при этом генетическим содержанием, что традиционно считается более глубоким проникновением в существо изучаемого геологического объекта. Мы не можем согласиться с таким подходом по ряду причин.

Во-первых, генетическое представление является лишь одной из возможных интерпретаций наблюдаемой картины явления, нацеленной на выяснение механизма его образования. И оно никак невозможно без содержательной, собственно структурной концепции объекта, имеющей самостоятельную познавательную ценность. Во-вторых, классические измерения форм и размеров минеральных зерен в агрегатах до сих пор не дали ответа на вопрос о том, на каком пространственном рубеже из отдельных зерен образуется агрегат как новое целое с устойчивой организационной характеристикой. Другими словами, что является элементарным материальным носителем структуры горной породы? Наконец, в-третьих, все существующие характеристики форм и размеров зерен уже потому не могут являться мерой организации сложного агрегата в строгом смысле слова, что она должна быть вещественной, неотрицательной, монотонной и аддитивной функцией его состояния [6]. И лишь такая мера представляется нам перспективной для универсальной и целостной характеристики организации агрегатов.

Сказанное заставляет нас обратиться к строгому анализу некоторых исходных понятий. В первую очередь следует обратить внимание на то, что меры задаются на специфических множествах, так называемых алгебрах. Автором ранее предлагалась удовлетворяющая этому требованию теоретико-множественная конструкция сложного минерального агрегата [4,5]. В главных чертах она сводится к следующему. Горная порода является не только топологически связной, но и плотной совокупностью минеральных зерен в том смысле, что всякое зерно в ней имеет полную оболочку своих соседей. Если среди последних содержится замкнутая пора, то ее следует считать самостоятельной фазой. Положим это утверждение в основу представлений о строении сложных минеральных агрегатов

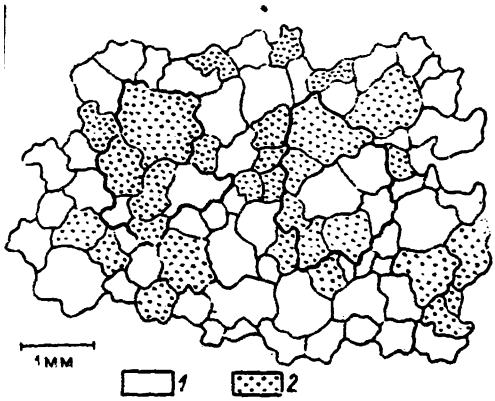


Рис.1. Структура двух ячеек безрудного габбро-норита Федоровс-Панского массива. Шлиф
1 – плагиоклаз; 2 – пироксены

Назовем ячейкой группу зерен, состоящую из ядра и его полной оболочки (рис.I). Всякое зерно из оболочки может быть принято за центр новой ячейки. Этот алгоритм позволяет выделить в изображении как угодно большой – по числу слагающих его ячеек – агрегат. Назовем идеальным агрегат, допускающий точное ячеистое покрытие. Всякий реальный агрегат имеет инфимальное (максимальное нижнее) идеальное приближение, в крайнем случае нулевое. Таким образом, все природное многообразие минеральных агрегатов распадается на классы эквивалентности, под которыми мы понимаем совокупности агрегатов, имеющих в качестве инфимального идеального приближения один и тот же агрегат. Сводя описание реального агрегата к описанию его идеального приближения, мы жертвуем рельефом оболочки ради ее внутреннего содержания, подобно тому как минералог пренебрегает рельефом граней кристалла при описании его габитуса.

Рассмотрим совокупность внутренних, не принадлежащих оболочке, зерен идеального агрегата. Построим множество всех их сочетаний (субагрегатов), не обязательно топологически связных. Оно замкнуто относительно теоретико-множественных операций объединения и дополнения любого числа своих элементов, т.е. является алгеброй [6]. Назовем его Z–множеством в связи с тем, что при построении нами была использована аксиоматика неиерархических множеств Е.Цермело [2]. В предыдущих рассуждениях неявно подразумевалось, что рассматриваемый минеральный агрегат конечен. Это ограничение можно явным образом снять. Нетрудно было бы показать, что бесконечный идеальный агрегат допускает покрытие счетным числом ячеек и порождает Z–множество мощности континуума, в котором свойства алгебры выполняются для любой счетной совокупности элементов, т.е. так называемую сигма–алгебру [IO]. Смысл предложенной конструкции состоит в том, что теперь при задании для как угодно большого идеального агрегата некоторой меры организации последний может быть измерен и сопоставлен по мере с любым из своих субагрегатов. Назовем Z–множество с заданной на нем мерой измеримым пространством. По существу, это и есть объект изучения минералога и петрографа, исследующих организацию сложного минерального агрегата.

Описанная процедура построения измеримого пространства в том или ином виде входит в основание теории вероятностей, статистической термодинамики (понятие ансамбля Гиббса) и ряда других теорий, описывающих стохастические системы и процессы. Она нужна для строго определения исходных понятий. По-видимому, теория сложных минеральных агрегатов также не может обойтись без

нее. Причина заключается в том, что агрегат является недетерминированной системой. Иначе говоря, всякое зерно в нем лишь с некоторой вероятностью определяет свое окружение. Это принципиально отличает его от кристалла. Именно поэтому для описания организации агрегата нам понадобилась более общая теоретико-множественная конструкция, чем понятие решетки [1]. В то же время в каждом конкретном случае нет необходимости строить Z -множество, если вопрос заключается только в том, чтобы измерить организацию идеального агрегата. Вероятностный характер сложных агрегатов подводит нас к идее использовать в качестве меры организации энтропию статистического распределения некоторого описывающего параметра. По определению, она вещественна, неотрицательна, аддитивна и монотонна в том смысле, что большее значение энтропии соответствует наименее структурированному состоянию системы, т.е. является мерой. Следовательно, проблема сводится к выбору подходящего описывающего параметра.

Возвращаясь к представлению о том, что минеральный агрегат есть топологически связная совокупность минеральных зерен, заметим следующее. Можно лишь отчасти согласиться с тем, что его организация "является результирующей совокупностью форм слагающих его индивидов" [1, с.12]. Как отмечалось выше, такой подход до сих пор не позволил вывести целостную характеристику агрегата из индивидуальных характеристик зерен. Нам представляется целесообразным сместить акцент на анализ их отношений в сложном агрегате. Это соответствует известному принципу, согласно которому сложность любой системы в большей мере определяется дифференцированностью отношений между ее элементами, чем количеством последних. Так, форма минерального зерна в агрегате рассматривается нами только как выражение его топологических отношений с зернами оболочки в образуемой ими ячейке, без учета масштабно зависимых деталей его фактической геометрии. Таким образом, процитированное утверждение верно, если только под формой минерального зерна понимать локальную топологию агрегата. Она имеет две стороны: совокупность отношений агрегативности и координационных отношений между минеральными зернами. Первая характеризует статистическое распределение различных типов межзерновых контактов в агрегате, вторая – распределение всех имеющих место координаций для каждого из слагающих агрегат минеральных видов. Вопрос о том, однозначно ли фиксируют два указанных типа статистических распределений макрофизиографию сложного минерального агрегата при фиксированном модальном составе, требует дальнейшего исследования. В данной статье это утверждение постулируется. Иначе говоря, в класс эквивалентности объединяются все реальные агрегаты, инфимальные идеальные приближения которых имеют одинаковую топологию в статистическом смысле.

Первый описывающий параметр удобно представить в виде матрицы агрегативности

$$A = \left\| \begin{matrix} p_{11} & p_{12} & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & p_{2n} \\ \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{nn} \end{matrix} \right\|,$$

где n – число слагающих агрегат минералов; p_{ij} – вероятность встречи в нем межзерновой границы i-го и j-го минералов.

Способ заполнения матрицы ясен из условия

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} p_{ij} = 1.$$

Второй описывающий параметр распадается на n координационных спектров, представимых в виде гистограмм частоты встречаемости различных координаций. В обоих случаях энтропия статистического распределения вычисляется по формуле

$$H = -\sum_{i,j} p_{ij} \ln p_{ij}.$$

Из свойств функции H известно, что она достигает максимума $\ln n(n+1)/2$ если $p_{ij} = 2/n(n+1)$ для всех i,j. Наоборот, она стремится к нулевому минимуму, когда какая-либо из вероятностей p_{ij} стремится к единице. Это будет иметь место, когда в агрегате преобладают минеральные срастания определенного вида, например монominеральные, лейкократовые или меланократовые. Но именно в силу этой особенности весь изложенный выше математический аппарат пригоден для сравнительного анализа организации пород Федорово-Панского интрузива.

Переходя к обсуждению результатов измерений, заметим, что для целей данного исследования оказалось возможным объединить меланократовые ортопироксен и клинопироксен, противопоставив их в матрице агрегативности лейкократовому плагиоклазу. Это существенно упростило нашу задачу, свело значение n с трех до двух. Итак, следует сказать, что шлировые разновидности пород по сравнению с массивными характеризуются пониженными значениями энтропии H, показывая тем самым более высокую степень структурированности.

На рис.1, 2 показаны идеальные агрегаты, выделенные из изображений петрографических шлифов безрудного и платиноносного габбро-норитов в соответствии с описанным выше алгоритмом. Выбор исходного зерна и последующих ячеек производился с помощью генератора случайных чисел. Первый агрегат содержит 20, второй – 50 ячеек. Макроскопически их организации не отличимы. После каждого шага наращивания для обоих агрегатов корректировались матрицы агрегативности и координационные спектры пироксенов и плагиоклаза. Для всех статистических распределений рассчитывалась энтропия. Установлено, что с ростом числа ячеек колебания энтропии для матриц агрегативности постепенно затухают (рис.3). Для безрудного габбро-норита значение энтропии стремится к 1,024, для платиноносного – к 0,983, что в отношении к максимально возможному значению составляет 93 и 89 %. Координационные распределения ведут себя аналогично. Их предельный вид показан на рис.4. Они характеризуются следующими значениями энтропии: для пироксенов в безрудных габбро-норитах – 1,641 (79 % от максимума), в платиноносных – 1,533 (72 %); для плагиоклазов в безрудных габбро-норитах – 1,751 (90 %), в платиноносных – 1,605 (82 %). Все статистические распределения в платиноносных габбро-норитах характеризу-

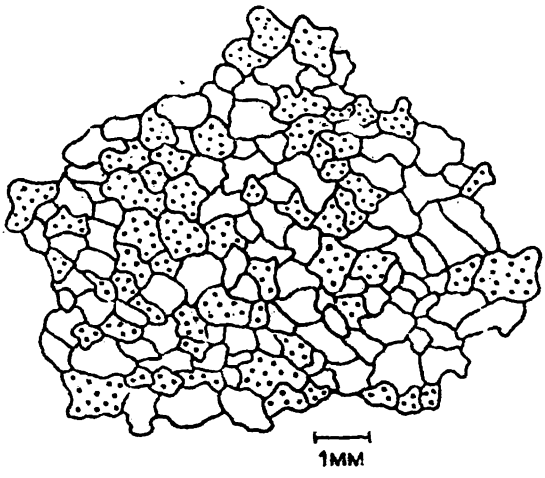


Рис.2. Структура платиноносного габбро-норита. Шлиф. Обозначения см. на рис.1

ются пониженными энтропиями по сравнению с безрудными аналогами. Подчеркнем, что для сравнения были взяты макроскопически не отличимые образцы. Достаточно очевидно, что иначе различие было бы еще заметнее. Но в этом случае количественный метод анализа просто не нужен.

Из приведенных результатов следует как теоретический, так и практический выводы. Теоретический вывод состоит в том, что в силу стохастического характера сложного минерального агрегата энтропия статистического распределения любого описывающего его параметра по мере увеличения числа ячеек бу-

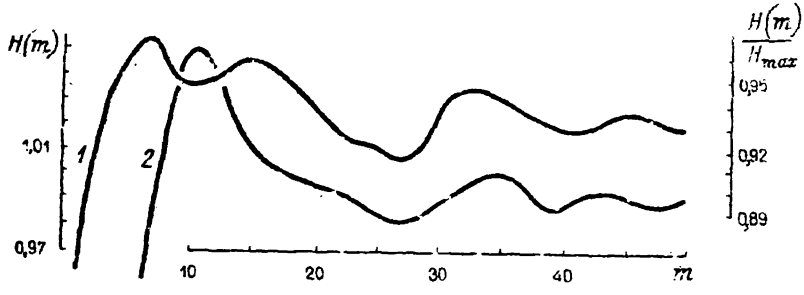


Рис.3. Зависимость абсолютной $H(m)$ и относительной $H(m)/H_{max}$ энтропий матрицы агрегативности для безрудного (1) и платиноносного (2) габброноритов в зависимости от числа m образующих агрегат ячеек

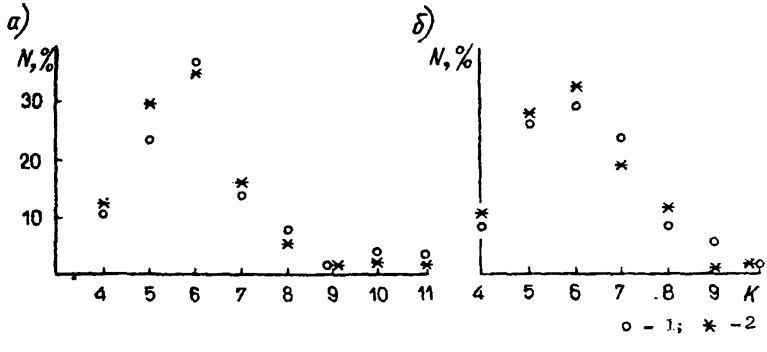


Рис.4. Частота встречаемости N различных координаций K для зерен пироксенов (а) и плагиоклаза (б) в безрудном (1) и платиноносном (2) габброноритах

дет все время колебаться около предельного значения, постепенно приближаясь к нему в том смысле, что размахи колебаний будут постепенно уменьшаться. Именно предельные значения характеристик следует считать структурными в силу их устойчивости. Фактическая организация всякого образца передает структуру агрегата лишь с некоторой точностью. Сравнение структур не есть сравнение организаций. Для горной породы можно строго определить понятие элементарного объема лишь с указанием его вероятностной характеристики (степени точности). Внешняя морфология элементарного объема при этом значения не имеет. Она подвижна, эластична и пробегает все возможные варианты из класса эквивалентности. Эти черты принципиально отличают сложные минеральные агрегаты от кристаллов минералов и в определенном смысле, на макроскопическом уровне восприятия, приближают их к аморфным веществам. Практический вывод очевиден: платиноносные габбро-нориты Федорово-Панского интрузива показывают, по сравнению с безрудными аналогами, более высокую степень структурированности. Предложенный метод количественного сравнения организации макроскопически не отличимых пород может быть использован для расчленения монотонных частей разреза интрузива и локального прогнозирования его наиболее перспективных горизонтов.

Не менее важным представляется и следующее общее заключение. Прогнозирование рудоносности геологических объектов, как правило, основано на представлениях об их генезисе. Из наблюдаемых фактов по частям восстанавливается траектория модельной системы в некотором фазовом пространстве управляющих параметров. Чем лучше известна эта траектория, тем более достоверным считается прогноз рудоносности объекта. Такая логическая цепочка явно или неявно использует сильные допущения о термодинамической закрытости системы и непрерывности ее эволюции. Между тем, часто наблюдаемое влияние боковых пород на формирование оруденения в эндоконтактовых частях интрузивов снимает первое допущение даже в виде локального приближения и вынуждает вводить более общие синергетические представления о развитии сложных термодинамически открытых систем [9]. Они же позволяют рассматривать последовательность геологических событий как единый - со скачками - процесс. Обсуждение организации горной породы с этой точки зрения целесообразно и в силу того, что она обычно содержит информацию сразу обо всей истории породы и устойчива к изменяющим воздействиям. В рамках синергетических представлений находит принципиальное объяснение согласованное поведение геологической системы на различных иерархических уровнях [1]. Обсуждение прямых свидетельств открытости системы при формировании комплексного оруденения Федорово-Панского интрузива осталось за пределами данной статьи. Среди них - ряд геолого-структурных и минералогических особенностей оруденения. Но, может быть, самым веским свидетельством остается наблюдающееся согласованное структурирование вещества интрузива на трех иерархических уровнях: геолого-структурном, петрографическом и геохимическом, один из которых получил количественную оценку в данной работе.

Автор благодарит кандидатов геолого-минералогических наук Н.Л.Балабонина и Н.Н.Веселовского (Геологический институт КНЦ РАН) за обсуждение методики и результатов исследования, несомненно способствовавшее их более ясному изложению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бродская Р.Л. Теория и практика исследования структуры магматических пород: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук в форме научн. доклада / Ленингр. горный ин-т. Л., 1991. 48 с.

2. Ван-Хао, Мак-Нотон Р. Аксиоматические системы теории множеств. М.: ИЛ, 1963. 54 с.

3. Веселовский Н.Н., Войтеховский Ю.Л., Рыжев С.А. Геохимические особенности комплексной минерализации Федорово-Панского расслоенного интрузива (Кольский полуостров) // Геохимия рудных элементов в базитах и гипербазитах. Критерии прогноза: Матер. Всесоюз. совещ., Иркутск, 4-8 сент. 1990 г./Ин-т Земн. коры СО РАН. Иркутск, 1990. С. 58-62.

4. Войтеховский Ю.Л. К общей концепции горной породы. Структурный аспект // Теория минералогии: Тез. докл. II Всесоюз. совещ., Сыктывкар, 21-23 мая 1991 г. / Ин-т геологии Коми научн. центра УрО РАН. Сыктывкар, 1991. Т. 2. С. 87-88.

5. Войтеховский Ю.Л. Способ матричного описания организации горно-породного пространства // Геологическая синергетика: Тез. докл. Всесоюз. семинара, Алма-Ата, 21-23 окт. 1991 г. / Ин-т геологии АН СССР. Алма-Ата, 1991. С. 5-7.

6. Вулих Б.З. Краткий курс теории функций вещественной переменной. М.: Наука, 1965. 304 с.

7. Козлов Е.К. Естественные ряда пород никеленосных интрузий и их металлогения. Л.: Наука, 1973. 288 с.

8. Проскуряков В.В. Геологическое строение и особенности дифференциации основной интрузии Панских высот на Кольском полуострове // Основные и ультраосновные породы Кольского полуострова. Л.: Наука, 1967. С. 40-54.

9. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991. 240 с.

10. Хаусдорф Ф. Теория множеств. М.-Л.: ОНТИ, 1937. 304 с.