Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 2, 1969 г.

ПЕРВИЧНЫЕ ОРЕОЛЫ СОБСТВЕННО МАГМАТИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЛИКВАЦИОННОГО ТИПА

Т. И. Нюппенен

К ликвационному типу собственно магматических месторождений относятся промышленные скопления вкрапленных сульфидных медно-никелевых руд, которые встречаются в породах основного — ультраосновного состава (норитах, габбро-норитах, оливиновых диабазах, пироксенитах, перидотитах). По современным представлениям, образование месторождений ликвационного типа происходит путем разделения магмы на несмешивающиеся жидкости — силикатную и сульфидную еще до начала кристаллизации. Обособившиеся сульфидные выделения сливаются в капли и под влиянием большого удельного веса опускаются в придонные части интрузий, где образуют скопления. Месторождения ликвационных вкрапленных руд сингенетичны с вмещающими их породами. Сингенетичными, следовательно, будут и первичные ореолы этих месторождений. Степень изученности условий формирования месторождений этого генетического типа явно недостаточна, поэтому рассмотренные ниже представления о возникновении ореолов сингенетичных вкрапленных руд и интерпретация этих ореолов могут быть удовлетворительными лишь в той мере, в которой они соответствуют принятой ликвационно-магматической гипотезе формирования самих руд.

В соответствии с общими представлениями о физико-химических условиях генезиса сульфидных медно-никелевых месторождений, схему образования сингенетичных вкрапленных руд типа донной залежи в какой-то мере можно уподобить процессу оседания жидких капель с удельным весом d_2, в жидкой же среде — с плотностью d_1. При этом в первый момент времени систему можно считать монодисперсной, поскольку в идеализированном виде все частицы дисперсной фазы (сульфидные выделения) имеют одинаковые размеры во всех частях системы (интрузии) и по закону Стокса начнут оседать с одинаковой скоростью. Скорость перемещения жидких включений в жидкой же среде довольно точно характеризуется уравнением Рыбчинского — Адамара [Овчинников, 1959]

$$u = \frac{2}{3} g r^2 \frac{(d_2 - d_1)}{\mu_1} \frac{\mu_1 + \mu_2}{2\mu_1 + 3\mu_2}, \qquad (1)$$

где r — радиус оседающих частиц, *см*; μ_1 и μ_2 — коэффициент вязкости, соответственно, среды и оседающей капли *пуазы*.

В процессе перемещения сульфидные частицы будут сливаться в различных соотношениях, в результате чего образуются частицы разной величины и, соответственно, широкий спектр размеров частиц с плотностью d_2 (сульфидных капель). Каждая из этих частиц будет оседать со скоростью тем бо́льшей, чем больше радиус частицы.

По ориентировочным подсчетам Н. И. Сафронова [1963], скорость оседания сульфидных частиц реальных размеров в условиях среды с физическими параметрами, приблизительно отвечающими константам кристаллизующейся силикатной магмы, определяется следующими значениями:

Поперечные размеры частиц, *мм*	10	2	0,2	0,02	0,002
Расчетный радиус, *мм*	5	1	0,1	0,01	0,001
Скорость падения частицы, относительные единицы	1	$4\cdot10^{-2}$	$4\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-6}$	$4\cdot10^{-8}$
Вероятная скорость падения, *см/сек*	$1\cdot10^{-8}$	$4{,}2\cdot10^{-10}$	$4{,}2\cdot10^{-12}$	$4{,}2\cdot10^{-14}$	$4{,}2\cdot10^{-16}$
Путь, проходимый частицей в год, *см*	$3{,}15\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-4}$	$1{,}3\cdot10^{-6}$	$1{,}3\cdot10^{-8}$

Как видно из приведенных данных, даже непродолжительное перемещение частиц со столь различными скоростями повлечет за собой возникновение градиента концентрации. Очевидно также, что величина этого градиента определится временем, в течение которого система будет находиться в спокойном состоянии и сохранять свойства жидкости. Таким образом, вопрос о том, будут ли в данном конкретном массиве формироваться вкрапленные руды типа «донной залежи», определяется временем становления этого массива — функцией многих факторов геологического порядка. В равной мере это положение справедливо и в отношении возможности образования сингенетичного первичного ореола — непромышленной концентрации рудного вещества непосредственно над рудным телом.

По заключению Н. И. Сафронова [1963], распределение содержаний рудообразующих элементов в первичных ореолах собственно магматических месторождений и истолкование самого процесса образования ореола параллелизуется с результатами опытов Перрена. В опытах Перрена [Кройт, 1933] перемещение частиц гуммигута и мастики в воде определяется влиянием силы тяжести, действующей в направлении концентрации, и силами броуновского движения и диффузии, которые действуют в направлении рассеивания. Взаимодействие этих сил приводит к возникновению направленного вертикально градиента концентрации. Количественное распределение частиц в вертикальном разрезе такой системы определяется формулой Перрена

$$\ln \frac{n_2}{n_1} = K(h_1 - h_2), \qquad (2)$$

где n_1 и n_2 — число взвешенных частиц в единице объема эмульсии на высотах h_1 и h_2 над дном системы, $n_1 > n_2$ и $h_1 < h_2$; K — постоянная величина, равная $\frac{N}{RT} Vg(d_2 - d_1)$; N — число Авогадро, равное $6{,}024 \cdot 10^{23}$; R—газовая постоянная, равная $8{,}314 \cdot 10^7$ *эрг. град.*$^{-1}$ *моль*$^{-1}$; T — абсолютная температура, равная —273,16° С; V — объем оседающих частиц, *см*^{3}.

Простым алгебраическим преобразованием формула Перрена приводится к виду

$$n_2 = n_1 e^{K(h_1 - h_2)} \tag{3}$$

или

$$n_2 = n_1 e^{-k \Delta h}, \tag{4}$$

где Δh — расстояние по вертикали между уровнями с плотностями частиц h_1 и h_2; k — коэффициент, определяющий долю уменьшения количества частиц на единицу расстояния.

Сведений о закономерностях распределения рудообразующих компонентов и их спутников в разрезе рудоносных массивов в литературе чрезвычайно мало. До недавнего времени единственной работой, непосредственно затрагивающей распределение ряда элементов в разрезе никеленосных интрузий была довольно обстоятельная статья Г. Стонхауза [1954]. Он исследовал порядок распределения содержаний Ti, Mn, V, Ni, Co, Ga, Cr, Cu, Ag в норитах Садбери, содержащих оруденение вкрапленного типа и контактирующих со сплошными сульфидными рудами. Г. Стонхауз пришел к выводу о наличии слабоповышенных концентраций Ti, Mn, V, Cr и Ni в 100—150 *м* от рудного тела. Исходя из классических представлений о генезисе руд Садбери [Barlow, 1946; Hawley, 1962], можно полагать, что повышенные содержания указанных элементов есть результат постепенного изменения состава породы и присутствия в породе сингенетичной вкрапленности никельсодержащих сульфидов, количество которых постепенно увеличивается к лежачему боку норитового лополита.

Более обширные и основательные исследования характера распределения элементов в разрезе никеленосных интрузий Кольского полуострова и Северного Прибайкалья выполнены в 1956—1962 гг. Д. В. Полферовым и автором настоящей статьи. Результаты этих исследований дают основания считать, что по характеру распределения сингенетичной вкрапленности сульфидов никеля и меди интрузии можно разделить на два структурно-генетических типа: 1) интрузии, образовавшиеся в условиях гравитационно-кинетической дифференциации магмы; 2) интрузии нормальной кристаллизационно-гравитационной дифференциации.

В интрузиях первого типа промышленные концентрации полезного компонента распределены незакономерно. Рудные тела либо отсутствуют (рис. 1, *а*), либо имеют неопределенную форму, занимают самые различные структурные позиции в пределах массивов и располагаются с одинаковой вероятностью как в лежачем боку интрузии, так и в ее центральной части или в пределах висячего бока (рис. 1, *б*). Закономерного и выдержанного градиента концентрации в интрузиях этого типа не наблюдается.

К интрузиям первого типа можно отнести некоторые никеленосные массивы на Кольском полуострове, интрузии Северного Прибайкалья и др.

Формирование интрузий этого типа, по-видимому, тесно связано с явлениями гравитационного фракционирования компонентов магмы в абиссальных условиях и последующей гравитационно-кинетической дифференциации их при внедрении в приповерхностные части земной коры [Коутс, 1937; Полканов, 1953]. Характерными признаками этого структурно-генетического типа интрузии является их слоистое строение в сочетании с линейной ориентировкой кристаллов, что указывает на направленное движение магмы с включениями твердой фазы. Весьма

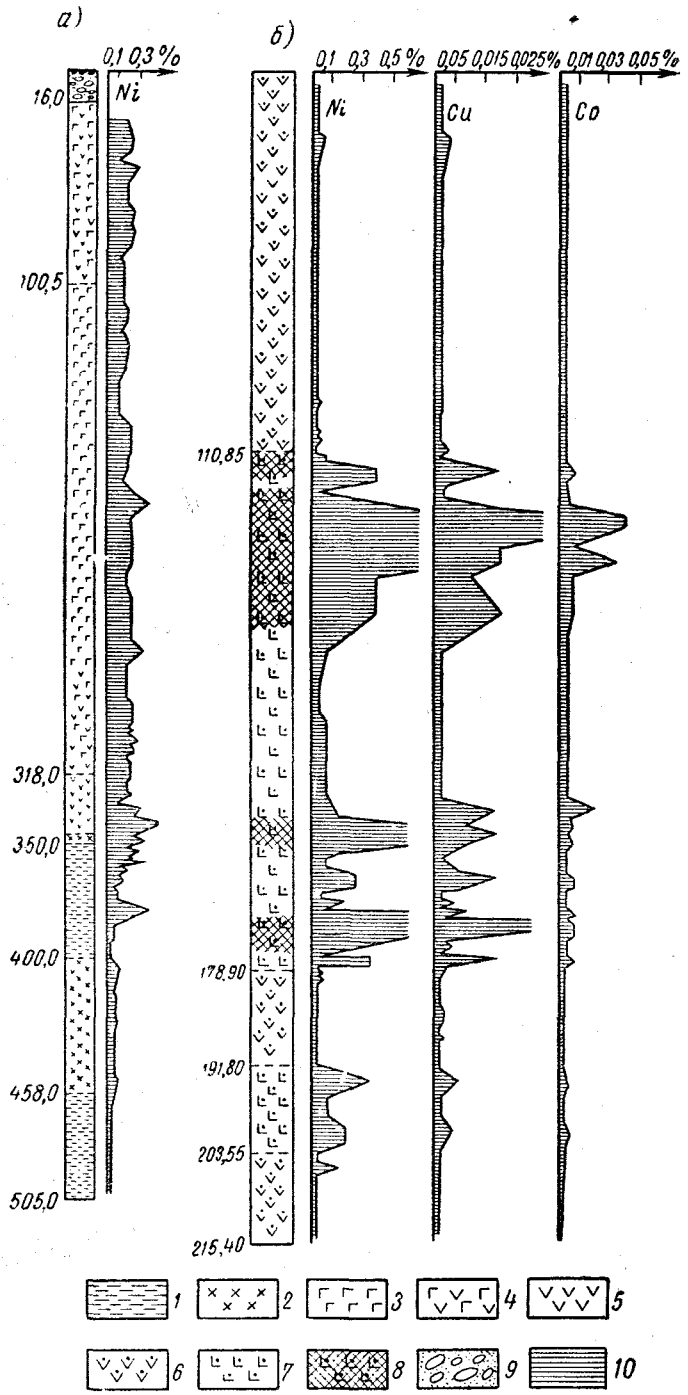


Рис. 1. Графики содержания рудообразующих элементов по разрезу интрузий *а* и *б*:

1—комплекс гнейсов и кристаллических сланцев (древний фундамент); *2*—нориты; *3*—перидотиты; *4*—перемежаемость перидотитов и пироксенитов; *5*—пироксениты; *6*—диориты (вмещающие породы); *7*—нориты и габбро-нориты никеленосного комплекса; *8*—вкрапленные и вкрапленно-гнездовые руды; *9*—моренные отложения

вероятно, что некоторые слои течения, образовавшие обогащенные оливином прослои в массивах, внедрились в верхние части земной коры в состоянии, близком к кристаллическому. При таком допущении частую перемежаемость прослоев перидотита и пироксенита в интрузиях Мончетундры можно рассматривать как результат ламинарного движения слоев жидкой и полужидкой магм *. Зоны сингенетичного вкрапленного оруденения в массивах гравитационно-кинетической дифференциации будут представлять собой слои течения, обогащенные сульфидами, отликвировавшими на глубине или в ходе внедрения магмы. Сульфидноносные слои течения могут занимать самое различное положение внутри массива. После внедрения в верхний структурный ярус относительного перемещения сульфидов не происходит.

В интрузиях нормальной кристаллизационно-гравитационной дифференциации содержание основных рудных компонентов, как правило, закономерно увеличивается в направлении от висячего к лежачему боку массива.

Анализ проб керна разведочных скважин интрузии в Печенгском районе Кольского полуострова показал, например, что содержание никеля в серпентинизированных перидотитах висячего бока интрузии равно примерно 0,07—0,12%, в метаперидотитах средней части оно увеличивается до 0,15—0,20% и в лежачем боку массива над зоной кондиционных руд достигает 0,25—0,30% (рис. 2). Графики содержания меди и кобальта повторяют график содержаний никеля, но при более низких значениях концентраций. Содержания Mn, Cr, V, Ti остаются практически равномерными по всей интрузии. Zn, Pb, Ag, Mo обнаружены только в единичных пробах рудной зоны. Аналогичная картина наблюдается и по другим скважинам этой интрузии. Характерно, что тенденция роста содержаний рудообразующих элементов с глубиной наиболее отчетливо проявляется по основному рудному компоненту — никелю и несколько слабее по второстепенным компонентам — меди и кобальту.

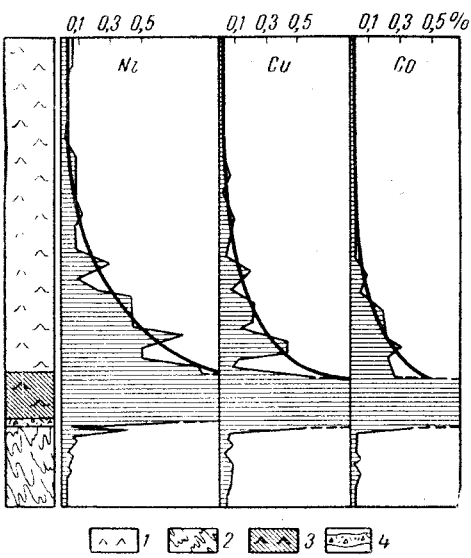


Рис. 2. Графики содержания никеля, меди и кобальта по разрезу интрузий Печенги:

1—серпентиниты и серпентинизированные перидотиты; *2*—филлиты и туффиты; *3*—вкрапленные руды; *4*—богатые эпигенетические руды

Содержание рудообразующих элементов по разрезу изменяется прогрессивно (рис. 2). Графики концентрации, выраженные в линейном масштабе, отвечают типу экспоненциальной кривой и могут быть

* Гипотеза о передвижении перидотитовых масс в верхние части литосферы путем интрузии в кристаллическом состоянии предложена Н. Л. Боуэном [1934] более 30 лет назад, подтверждена экспериментальными исследованиями Н. Л. Боуэна и О. Ф. Таттла [1950] и развита Ф. Тернером и Д. Ферхугеном [1961].

аппроксимированы показательной функцией типа

$$C_x = C_p e^{-\lambda x}, \tag{5}$$

где C_x — содержание элемента в разрезе интрузии на глубине x от горизонта с содержанием C_p; λ — коэффициент, определяющий долю изменения содержаний на единицу расстояния.

Сходные по существу данные получены при изучении первичных ореолов собственно магматических месторождений Норильского района.

По наблюдениям И. Д. Волкова [1964], в дифференцированных интрузиях норильского типа концентрации никеля от подошвы к кровле горизонта оливинового габбро-долерита, залегающего непосредственно над рудоносными такситовыми габбро-долеритами, закономерно уменьшается по кривой, которую аналитически можно выразить эмпирической формулой

$$C_x = 0{,}0625\,(0{,}980)^x, \tag{6}$$

где C_x — содержание рудного компонента в оливиновом габбро-долерите на расстоянии x от такситового габбро-долерита, несущего промышленную руду.

Формула (6) легко преобразуется в показательную функцию

$$C_x = 0{,}0625\, e^{-0{,}020\, x}. \tag{7}$$

Совершенно очевидно, что эта эмпирическая формула является частным случаем выражения показательной функции типа (5) с найденными коэффициентами C_p и λ.

Таким образом, в массивах Печенгского района, как и в дифференцированных интрузиях норильского типа, распределение концентраций рудообразующих компонентов в вертикальном разрезе интрузий хорошо согласуется с результатами опытов Перрена и может быть выражено показательной функцией типа (5). Однако при этом необходимо учитывать, что параметр C_p в формуле (5) характеризует содержание рудного компонента на уровне рудного тела или вблизи него, и следовательно, зависимость (5) можно использовать только при известном содержании компонента в рудном теле. Поэтому практически удобней пользоваться функцией вида

$$C_x = C_0 e^{\lambda x}, \tag{8}$$

которая характеризует изменение содержаний в направлении концентрации вещества. В этом случае параметр C_0 будет выражать фоновое содержание элемента в породах интрузии и определяется уже в пределах кровли интрузии. Коэффициент λ определяет темп концентрации рудообразующих компонентов при ликвационно-гравитационной садке рудного вещества и численно характеризует долю увеличения содержания рудного компонента на единицу глубины. На практике λ определяется как натуральный логарифм отношения содержания элемента на глубине x_n к содержанию на глубине x_{n-1}, т. е.

$$\lambda = \ln \frac{x_n^*}{x_{n-1}}. \tag{9}$$

Применимость формул (8) и (9) для выражения порядка распределения содержаний рудообразующих элементов в вертикальном раз-

* Во избежание грубых ошибок следует пользоваться среднегеометрическим значением коэффициента λ, вычисленным по ряду фиксированных точек или интервалов по вертикали.

резе никеленосных массивов Печенгского района проверена по результатам опробования керна нескольких разведочных скважин (см. таблицу).

Показатели распределения содержания никеля в вертикальном разрезе интрузий Печенгского района

Номер скважины	Параметры функции				Содержание элемента на глубине 220 *м* по скважине	
	C_0	$\frac{C_x}{C_{x-1}}$	λ	x	по функции	по опробованию
272	0,14	1,019	0,0186	70	0,19	0,17
635	0,13	1,020	0,0198	120	0,26	0,25
766	0,14	1,022	0,0217	150	0,38	0,36

Следовательно, гипотеза о ликвационно-магматическом происхождении промышленных концентраций вкрапленных сульфидных медно-никелевых руд типа «донной залежи» достаточно реальна. Можно полагать, что в массивах типа нормальной кристаллизационно-гравитационной дифференциации гравитационная садка сульфидных капель в условиях магматического расплава действительно имеет место, и вследствие различного размера рудных частиц эти капли будут оседать с различной скоростью. В результате к моменту полной кристаллизации магмы возникает закономерный градиент концентрации, непромышленную часть которого можно считать первичным ореолом сингенетичных вкрапленных руд.

Возможны случаи, когда в результате незначительного перемещения сульфидных частиц образуется слабовыраженный градиент, но промышленных концентраций рудного материала не окажется. Такая обстановка сложится при относительно высокой вязкости интрудирующей магмы и незначительном времени кристаллизации в спокойной обстановке.

Нормальный градиент изменения содержаний, обусловленный распределением количества и размеров сульфидных частиц, может быть усложнен относительной дифференциацией самих сульфидов, а следовательно, и рудных компонентов вследствие различного удельного веса минералов. Так, по представлениям Н. И. Сафронова [1963], в сингенетичных медно-никелевых рудах, сложенных пирротином (с удельным весом $d=4{,}6$ *г/см*^{3}), пентландитом ($d=4{,}9$ *г/см*^{3}) и халькопиритом ($d=4{,}2$ *г/см*^{3}), последний должен «зависать» несколько выше пирротин-пентландитовых скоплений, что обусловливает вероятность зонального распределения компонентов по вертикали ореола собственно-магматического месторождения.

Фактическими материалами предполагаемую зональность ореолов собственно-магматических месторождений подтвердить пока не удалось. Графики содержания никеля, меди и кобальта по разрезу интрузий практически идентичны и не дают оснований для утверждений о «зависании» халькопиритового ореола. Не наблюдается заметного разделения никеля и меди по изменению величины отношения $C_{Cu} : C_{Ni}$ как функции от глубины.

При изучении под микроскопом полированных шлифов, дублирующих значительную часть анализируемых проб, установлено, что в абсолютном большинстве сингенетичные сульфидные вкрапленники пред-

ставляют собой зерна пирротина с включениями пентландита, тесно ассоциирующие с халькопиритом. Обособленные вкрапленники халькопирита в никеленосных породах почти не встречаются. Естественно, что гравитационная дифференциация сульфидных масс на существенно пирротин-пентландитовые и халькопиритовые части осуществима лишь в масштабе единого рудного агрегата, но не всей интрузии. И, действительно, подобного рода расслоенные вкрапленники сульфидов, верхнюю часть которых занимает халькопирит, а нижнюю — пирротин-пентландитовая масса, наблюдали в дифференцированных интрузиях Норильского района Н. С. Зонтов [1958] и М. Н. Годлевский [1959]. В рудоносных интрузиях Печенгского района расслоенные вкрапленники сульфидов встречал Г. И. Горбунов [1963].

ЛИТЕРАТУРА

Боуэн Н. Л. Эволюция изверженных пород. Перев. с англ. под ред. В. И. Лучицкого, ОНТИ НКТП СССР, 1934.

Боуэн Н. Л., Таттл О. Ф. Система $MgO—SiO_2—H_2O$. Сб. «Вопросы физико-химии в минералогии и петрографии». ИЛ, 1950.

Волков И. Д. О методике геохимического опробования габбро-долеритовых интрузий в Норильском районе. Уч. записки НИИГА, вып. 3, 1964.

Годлевский М. Н. К вопросу о генезисе сульфидных медно-никелевых месторождений на Сибирской платформе. Геология рудных месторождений, № 2, 1959.

Горбунов Г. И. Минералого-геохимические особенности сульфидных медно-никелевых руд Печенги. Сб. «Материалы по минералогии Кольского полуострова», вып. IV. Наука, 1965.

Зонтов Н. С. Закономерности дифференциации медно-никелевых сульфидных расплавов. Советская геология, № 6, 1958.

Коутс Р. Первичная полосчатость в основных глубинных породах. Переводы по геологии и полезным ископаемым. № 85, 86. Центр. геол. библ. Л., 1937.

Кройт Г. Р. Коллоиды. Госхимтехиздат, 1933.

Овчинников Л. Н. Некоторые вопросы магматического рудообразования. Изв. АН СССР, Сер. геологич., № 4, 1959.

Полканов А. Н. Гравитационное фракционирование твердой фазы и кристаллизационная дифференциация. В кн. «Вопросы петрографии и минералогии», ч. I. Изд. АН СССР, 1953.

Сафронов Н. И. Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Методич. пособие. Ч. II. Изд. ВИТР, Л., 1963.

Тернер Ф., Ферхуген Д. Петрология изверженных и метаморфических пород. ИЛ, 1961.

Barlow A. E. Econ. Geol., № 1, 1946.

Hawley J. E. Canad. Mineralogist, v. 7, № 1, 1962.

Stonehouse H. Amer. Mineralogist, v. 39, № 5—6, 1954.