DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10037

УДК 553.49'43'481(571.51)
© А.П.Лихачев, 2019

Специфические особенности норильских рудоносных интрузий, их природа и определяющее значение в открытии Pt-Cu-Ni месторождений

А.П.ЛИХАЧЕВ (Федеральное государственное бюджетное учреждение Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГБУ «ЦНИГРИ»); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Выделяются и характеризуются основополагающие особенности и закономерности в строении, составе, морфологии, размещении и формировании рудоносных интрузий Норильского района, абсолютные в своём проявлении и определяющие в применении, независимо от объяснений их происхождения. Использование таковых будет способствовать открытию новых платино-медно-никелевых месторождений.
Ключевые слова: Норильский район, специфические особенности рудоносных интрузий, поиски и открытия Pt-Cu-Ni месторождений.

Лихачев Александр Петрович
доктор геолого-минералогических наук
alexanderlikhachev@rambler.ru

The specific features of the Norilsk ore-bearing intrusions, their nature and crucial importance in the discovery of Pt-Cu-Ni deposits

A.P.LIKHACHEV (Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals)

The basic features and patterns in the structure, composition, morphology, location and formation of ore-bearing intrusions of the Norilsk region, absolute in their manifestation and essential in use, regardless of their origin, are distinguished and characterized. The use of such features and patterns will contribute to the discovery of new platinum-copper-nickel deposits.
Key words: Norilsk region, specific features of ore-bearing intrusions, exploration and discovery of Pt-Cu-Ni deposits.

Статья является продолжением работы автора [7], в которой показано, что накопление рудных веществ норильских Pt-Cu-Ni месторождений могло осуществляться в сложных и длительных процессах: при зарождении магм в мантии, на пути их подъёма в пределы земной коры и в ходе внедрения и становления интрузий в конечных камерах.

Условия концентрации рудных компонентов при зарождении и подъёме магм рассмотрены в той же работе [7]. В данной статье обсуждаются вопросы их накопления в ходе внедрения и становления интрузий. При этом выделяются, характеризуются и объясняются следующие, свойственные только рудоносным интрузиям особенности и закономерности, которые определяют скопление рудных веществ и могут эффективно использоваться в поисках и открытии новых Pt-Cu-Ni месторождений.

Двучленное строение рудоносных интрузий. Рудоносные интрузии Норильского района состоят из двух частей (рис. 1): периферической силлообразной, слабо сульфидоносной (лейкократовой, существенно габбровой) и внутренней хонолитообразной, собственно рудоносной (меланократовой, габбро-долеритовой) [3, 4, 7, 12]. В данной статье речь идёт в основном о последней, рудоносной части.

Периферическая часть подробно описана в работе [7]. В вопросах прогноза и поисков месторождений она имеет исключительно важное значение, так как представляет собой легко опознаваемую головную (наиболее приближающуюся к земной поверхности и нередко обнажающуюся на ней) часть рудоносной магматической колонны, сложенную массовым скоплением интрателлурического плагиоклаза, комплементарным рудному веществу.

Рудоносная часть является основным объектом поиска. Она находится на продолжении головной (габбровой) части магматической колонны. При мощности 50–300 м дифференцирована от оруденелых контактового (Гк), такситового (Гт) и пикритового (Гп) габбро-долеритов внизу, через сульфидоносный оливин-биотитовый (Гоб) и слабосульфидоносные оливиновый (Го), оливинсодержащий (Гос) и безоливиновый (Гбо) габбро-долериты до практически бессульфидного габбро-диорита (Гд) вверху (см. рис. 1, разрезы Б-1, В-1). В верхнем эндоконтакте интрузий находятся фрагментарные тела лейкократового габбро, верхних контактового (Гвк), такситового (Гвт), пикритового (Гвп) и троктолитового (Гвтр) габбро-долеритов, которые по своему составу и структуре аналогичны породам периферического габбрового силла и являются его реликтами. Они подвержены вторичным изменениям. В них присутствует наложенная вкрапленная минерализация халькопирит-пентландит-пирротинового состава, нередко отличающаяся относительно высоким содержанием металлов платиновой группы [9].

Выявляется рудоносная часть геофизическими методами и последующим бурением скважин.

Вытянутость рудоносной части в одном направлении на расстоянии до 15 км и более при ширине от 500 до 2000 м. Эта особенность свойственна только рудоносным интрузивам (см. рис. 1, А–Д). Безрудные (трапповые) интрузии имеют площадное, силлообразное распространение, а слаборудоносные (Нижнеталнахско-Нижненорильского типа) в основном плитообразное (рис. 2, А).

Возможная причина связывается автором с различием в плотности внедряемых магм и вмещаемых пород [3]: наиболее тяжёлые сульфидоносные магмы, существенно преобладая над плотностью вмещающих пород, «вдавливались» в подстилающие толщи и тем самым профилировали своё движение в одном направлении (см. рис. 2, А). Другая, сочетающаяся с первой причина может состоять в однонаправленном плавлении высокотемпературной (до ~1300°С) сульфидоносной магмой вмещающих пород на фронте внедряющейся магматической колонны, в месте замыкания конвектирующего потока магмы с образованием однонаправленного канала (см. рис. 2, Б).

Практическое значение этой особенности заключается в возможности отличать перспективно рудоносные от безрудных магматических тел и выделять их с помощью геофизических методов на ранней стадии поисковых работ.

«Вставленность» рудоносных массивов во вмещающую среду без признаков существенного её нарушения и «бесследного» исчезновения материала, занятого интрузивами пространства. Пространство, требуемое для размещения внедряемой магмы в земной коре, может создаваться несколькими процессами: 1) раздвижением под напором магмы слоёв в разные стороны с оставлением при этом следов и признаков проявления процесса в виде смещения исходных границ; 2) уплотнением (также под давлением магмы) вмещающей среды со смещением и без смещения исходных границ; 3) вытеснением магмой материала коры с оставлением следов и признаков происшедшего; 4) «вымыванием» пространства потоком магмы с разрушением вмещающего материала плавлением, растворением и механическим воздействием и выносом разрушенного материала за пределы магматического тела. В образовании рассматриваемых рудоносных интрузий наиболее вероятен последний вариант, так как для других не имеется существенных признаков их проявления.

Примеры соотношений рудоносных интрузий с вмещающими породами с признаками их «вставленности» показаны на рис. 1 (разрезы Б-1, В-1, В-2 и Д-1). Из них особо примечателен разрез В-2 в его левой (западной) части. Здесь при отработке месторождения Норильск I карьером рудника «Угольный ручей» были полностью и «аккуратно» вынуты породы интрузива с оставлением практически нетронутой поверхности (границы) его крутого контакта с вмещающими базальтами субгоризонтального и перпендикулярного к контакту залегания. На протяжении многих лет она была открытой и выглядела изогнутой плоскостью, имеющей сглаженный вид. Работая геологом на этом руднике, автор обращал на неё внимание и принимал за зеркало тектонического скольжения. Однако существенных тектонических смещений и перемещений в этой части не фиксировалось ни во вмещающих породах, ни в интрузии. К тому же сама поверхность размещалась только на вмещающих базальтах, перпендикулярно «срезая» их. Возможно, что в данном месте сохранялись следы плавления магмой вмещающих толщ.

Другой примечательностью является разрез В-1 (см. рис. 1), в котором наиболее ярко проявлены резкое углубление дна интрузии в подстилающие толщи без нарушения их залегания и бесследное исчезновение материала вмещающих пород занятого интрузивом пространства. Здесь же наблюдается самая большая мощность пикритового горизонта (~120 м при общей мощности интрузивного массива ~290 м), в то время как в других местах этой и остальных рудоносных интрузий района при их общей мощности до 300 м мощность Гп меньше или не на много превышает 40 м (см. рис. 1, разрезы Б-1, В-2, Д-1).

Необычным является и тот факт, что в верхней части рассматриваемого пикритового горизонта находились сульфидные жилы субгоризонтального залегания мощностью до ≥30 см и протяжённостью до десяти и более метров. Они отличались высокими содержаниями меди и платиноидов. Эти жилы наблюдались автором в 1960 г. в опережающих, давно и далеко пройденных на юг заброшенных штольнях и в 1990 г. уже в открытом карьере рудника «Медвежий ручей» при сопровождении группы американских геологов, впервые посетивших

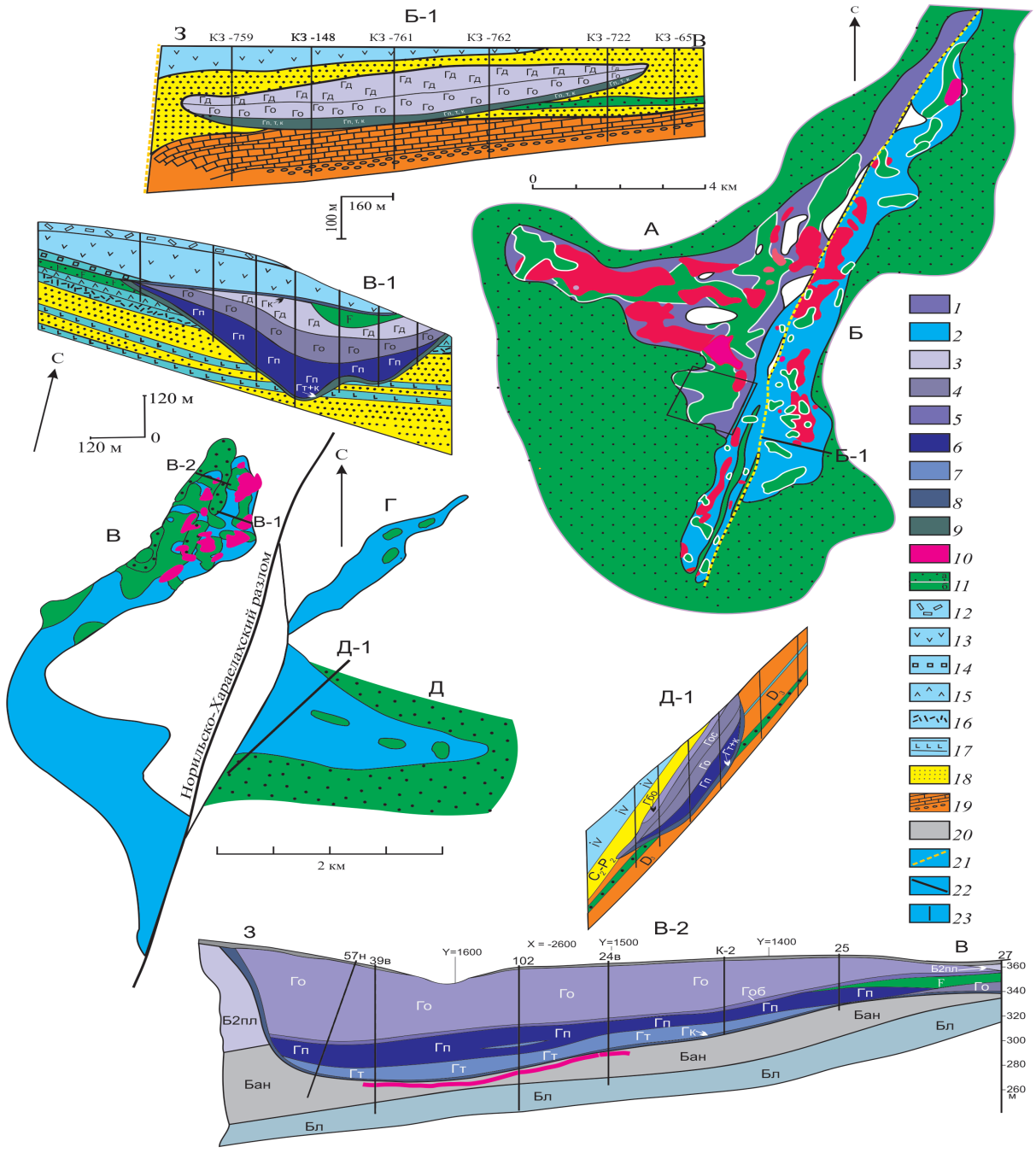


Рис. 1. Размещение и строение рудоносных интрузий Норильского района:

интрузии, план (А–Д) и разрезы к ним (Б-1–Д-1): А – Хараелахская, Б – Талнахская (Б-1), В – Норильск I (В-1, В-2), Г – Норильск II, Д – Черногорская (Д-1); внутренняя (рудоносная) часть интрузий: *1* – Хараелахской (белым показаны участки, где нет интрузивных тел), *2* – всех остальных; породы и руды (в цвете с различными знаками и без них): *3* – габбро-диорит (Гд), безоливиновый (Гбо) и оливинсодержащий (Гос) габбро-долериты, *4* – оливиновый (Го), *5* – оливин-биотитовый (Гоб), *6* – пикритовый (Гп), *7* – такситовый (Гт), *8* – контактовый (Гк), *9* – пикритовый+такситовый+контактовый (Гп+Гт+гк) габбро-долериты, *10* – массивные залежи сульфидных руд, *11* – силл лейкократового габбро (*а*) – периферическая часть интрузий – и «внутреннее» габбро (*б*); *12* – порфировый базальт Гудчихинской свиты (*gd*); *13* – толеитовый базальт Сыверминской свиты (*sv*); *14* – двуплагиоклазовый (Б2пл.), *15* – андезиновый (Бан) и *16* – лабрадоровый (Блб) базальты Ивакинской свиты (*iv*); *17* – силлы долеритов; *18* – породы тунгусской серии (C_2–P_2): песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли; *19* – отложения верхнего девона (D_3): известняки, мергели, доломиты; *20* – четвертичные отложения; *21* – Норильско-Хараелахский разлом; *22* – линии разрезов; *23* – буровые скважины; чёрный квадрат – приблизительные границы рис. 3

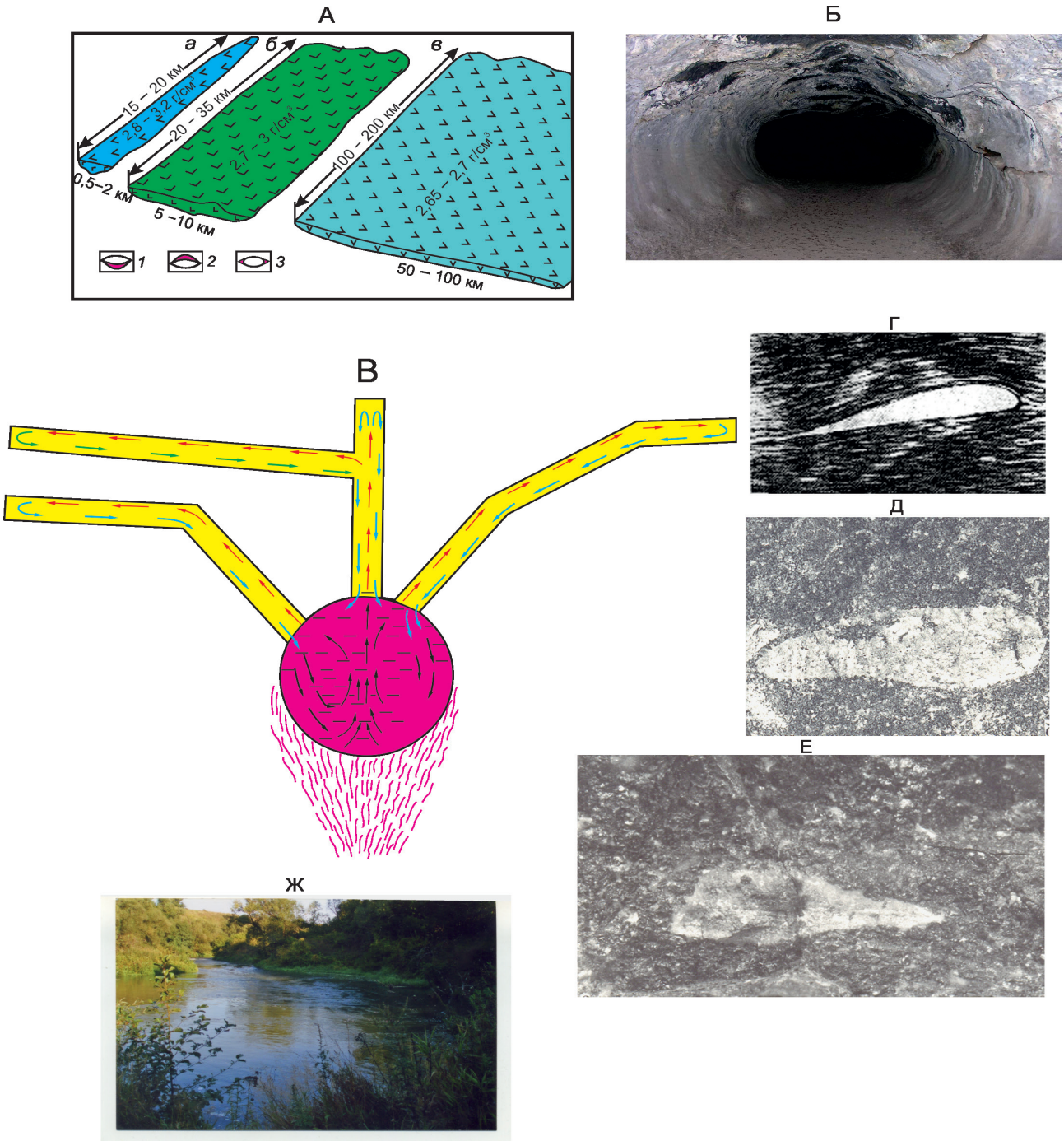


Рис. 2. Формы внедрения и закономерности течения магм:

А – формы внедрения магм: *а* – рудоносных, *б* – слаборудоносных, *в* – безрудных (на схемах внизу красным залиты участки растяжений в магматических камерах: *1* – при плотности магмы больше плотности вмещающей среды, *2* – меньшей, чем вмещающих пород, *3* – одинаковой плотности); Б – магматический канал в застывших лавах мафического состава, сформированный механическим и термическим воздействием потока расплава на вмещающую среду (фото из материалов Википедии); В – схема циркуляции жидкости (магматического расплава) в термоградиентных условиях: красные стрелки показывают направление прямого (горячего) потока, а синие – обратного (охлаждённого); Г–Е – ориентировка твёрдых тел в потоке жидкостей: Г – обтекание профиля самолётного крыла потоком жидкости [1]; Д, Е – форма и положение фенокристаллов плагиоклаза в пикритовом горизонте норильских интрузий, ув. 2; Ж – место перехода расширенного и углублённого участка реки в суженный мелкий

1. Химически й состав сульфидных руд Восточной ветви интрузии Норильск I, карьер «Медвежий ручей [11]

Компоненты	90OMZ	90MC	90MCZC	90MC
	S2-3	15	1	5
Ca, мас,%	0,23	0,11	<0,02	0,20
Fe	54,3	32,3	30,9	30,5
Ni	3,5	7,1	6,5	6,0
Cu	4,02	24,3	24,9	28,0
S	30,0	34,0	32,9	33,8
Co, г/т	1270	920	730	660
Zn	280	690	580	610
As	0,57	2,2	10	5,0
Se	58	218	328	241
Ag	<7	66	73	26
Cd	<7	8	<6	15
Sn	2,6	15	25	9,6
Sb	<0,05	0,25	1,2	0,29
Te	0,27	24	85	38
Au	0,17	11,1	11,4	1,2
T1	0,3	1,2	8,3	1,2
Pb	<10	<10	10	<10
Bi	0,20	4,5	3,8	7,8
Rh	0,27	0,32	0,04	0,15
Pd	10,8	337	233	445
Pt	1,4	106,4	215	38,5
Сумма МПГ	12,2	443,4	418	483,5

месторождения Норильска. Позднее в лабораториях Геологической службы США в отобранных образцах жил были установлены аномально высокие содержания МПГ (табл. 1).

Наблюдаемое большое углубление дна интрузива без признаков нарушения залегания вмещающих пород и следов удалённого корового материала, как и большой объём находящегося здесь магматического вещества не могли образоваться при одноразовом поступлении магмы (одним «заходом»). Для этого требовалось последовательно «выработать» большое пространство и бесследно удалить материал вмещающих пород, равный магматическому объёму. Такое возможно только при проявлении длительных процессов воздействия мантийной магмы, имеющей постоянную связь с питающим очагом.

Исключительно большая мощность пикритового горизонта не могла быть сформирована в результате отсадки и накопления зёрен оливина при кристаллизации сравнительно малой по объёму магмы вышележащих безрудных горизонтов. Образование Гп наблюдаемой мощности могло происходить преимущественно за счёт многократной смены свежей магмы, вызванной, вероятнее всего, её продольной конвекцией.

Размещение рудных жил в верхней части Гп свидетельствует о том, что сульфиды находились ещё в жидком состоянии, когда пикритовый горизонт был практически сформирован. Высокое содержание в них меди и платиноидов указывает на принадлежность к низкотемпературной фракции более общего сульфидного расплава, температурный интервал кристаллизации которого может составлять до 350°С, а длительность нахождения в жидком состоянии – многие сотни и даже тысячи лет [4]. Возможно, эта фракция была выжата вверх из нижележащих уровней рудоносного горизонта по причине проседания интрузива и сжатия его нижней части.

Требуемое для рудоносных интрузий пространство могло «вымываться» внедряющейся магмой вследствие её продольной циркуляции от тыловых, наиболее высокотемпературных частей магматической колонны (вплоть до питающего магматического очага) к фронтальным, существенно охлаждённым, и обратно. При этом проявляется та же конвекция магм, которая наблюдается в каналах современных вулканов и в их лавовых озёрах. Вынос разрушенного материала мог осуществляться обратным потоком магмы, возвращающимся по наклонному каналу (до 30° в наблюдаемой части интрузий) на глубинные уровни и формирующим свободное пространство, подобное по конфигурации лавовым трубам (см. рис. 2, Б).

Конвекция водных растворов, а также силикатных и сульфидных расплавов изучалась и наблюдалась автором визуально и под микроскопом в экспериментах по переотложению минеральных веществ в термоградиентных условиях. Они осуществлялись в прозрачных

2. Химический состав Болгохтохской интрузии (1), *по работе* [2], **и песчаников Норильского района** (2), *по работе* [10]

Компоненты	1	2
SiO_2	67,20	67,33
TiO_2	0,42	1,53
Al_2O_3	14,63	14,06
Fe_2O_3	1,29	2,71
FeO	2,24	4,93
MnO	0,04	0,05
MgO	1,91	1,43
CaO	2,14	0,66
Na_2O	3,24	0,74
K_2O	4,48	1,94

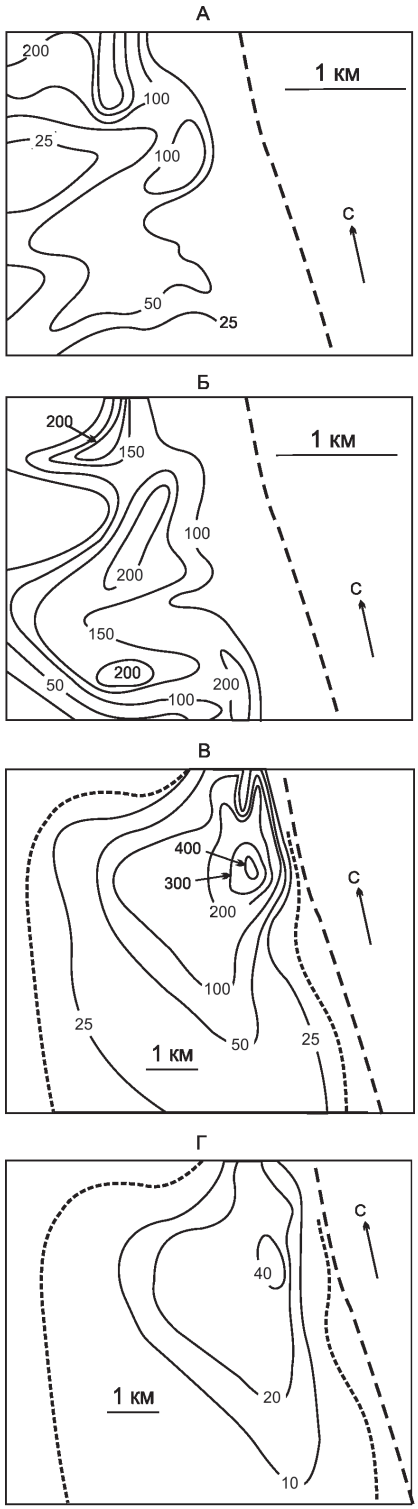


Рис. 3. Степень воздействия рудоносных (А, Б) и слаборудоносных (В, Г) интрузий на вмещающие породы. *По работе* [10]:

А, В – мощности интрузий; Б, Г – мощности экзоконтактовых образований, м; место нахождения площадей показано на рис. 1, А

кварцевых трубках (ампулах) внутренним диаметром от 2 до 20 мм и длиной до 1 м [4, 5]. Общая картина наблюдаемых и возможных вариантов конвекции изображена на рис. 2, В. Её действие определяется гравитационным и тепловым факторами. В горизонтальных и наклонных направлениях горячий поток движется по верхней половине канала, а охлаждённый (возвратный) – по нижней.

В рудоносных интрузиях Норильска имеются прямые признаки, указывающие на возвратное течение в них магмы. В частности, они проявляются в наблюдаемой автором противоположной (встречной) ориентировке асимметричных (клино- и крыловидных) протокристаллов оливина и плагиоклаза (см. рис. 2, Г–Е), находящихся в различных слоях одного разреза интрузива [4].

Согласно законам гидродинамики [1], энергетически наиболее выгодной конфигурацией тела, находящегося в потоке жидкостий или газа и испытывающего влияние гравитационного эффекта, является форма (профиль) самолётного крыла, оказывающего наименьшее сопротивление потоку (см. рис. 2, Г). Поэтому все неизометричные тела в потоках жидкостей и газов ориентируются наиболее массивной («головной») частью навстречу потоку, указывая, откуда он течёт, а «хвостовой» частью – в противоположном направлении, показывая, куда движется поток. При эрозионном воздействии жидкости или газа на твёрдое тело последнее стремится приобрести профиль крыла независимо от его первоначальной формы (см. рис. 2, Д, Е).

В рассматриваемом субгоризонтальном внедрении конвектирующей магмы во фронтальном замыкании (забое) её потока вмещающие породы могли разрушаться плавлением, растворением в силикатном расплаве и механическим путём (взламыванием). Для этого не требовались особо высокие температуры и полное плавление веществ. В магматических и терригенных породах достаточно было «подплавить» наиболее низкотемпературные (~800°С) края породообразующих минералов или их цемента, а в карбонатных – растворить водными флюидами расплава часть $CaCO_3$.

Разрушенный материал вмещающих пород мог уноситься обратным потоком магмы в более глубокие и высокотемпературные горизонты, гомогенезироваться там и накапливаться в краевых частях магматического очага с возможностью последующего проникновения в вышележащие толщи земной коры и образования интрузий кислого состава. Именно такое происхождение может иметь известный в Норильском районе «загадочный» (несвойственный трапповым формациям) Болгохтохский гранитоидный массив, имеющий сходство по основным компонентам с составом песчаников регионального разреза (табл. 2). Подобные проявления кислых (гранитоидных) продуктов в конце и после внедрения в земную кору и излияния на её поверхность мафитовых магм имеются и в других районах мира.

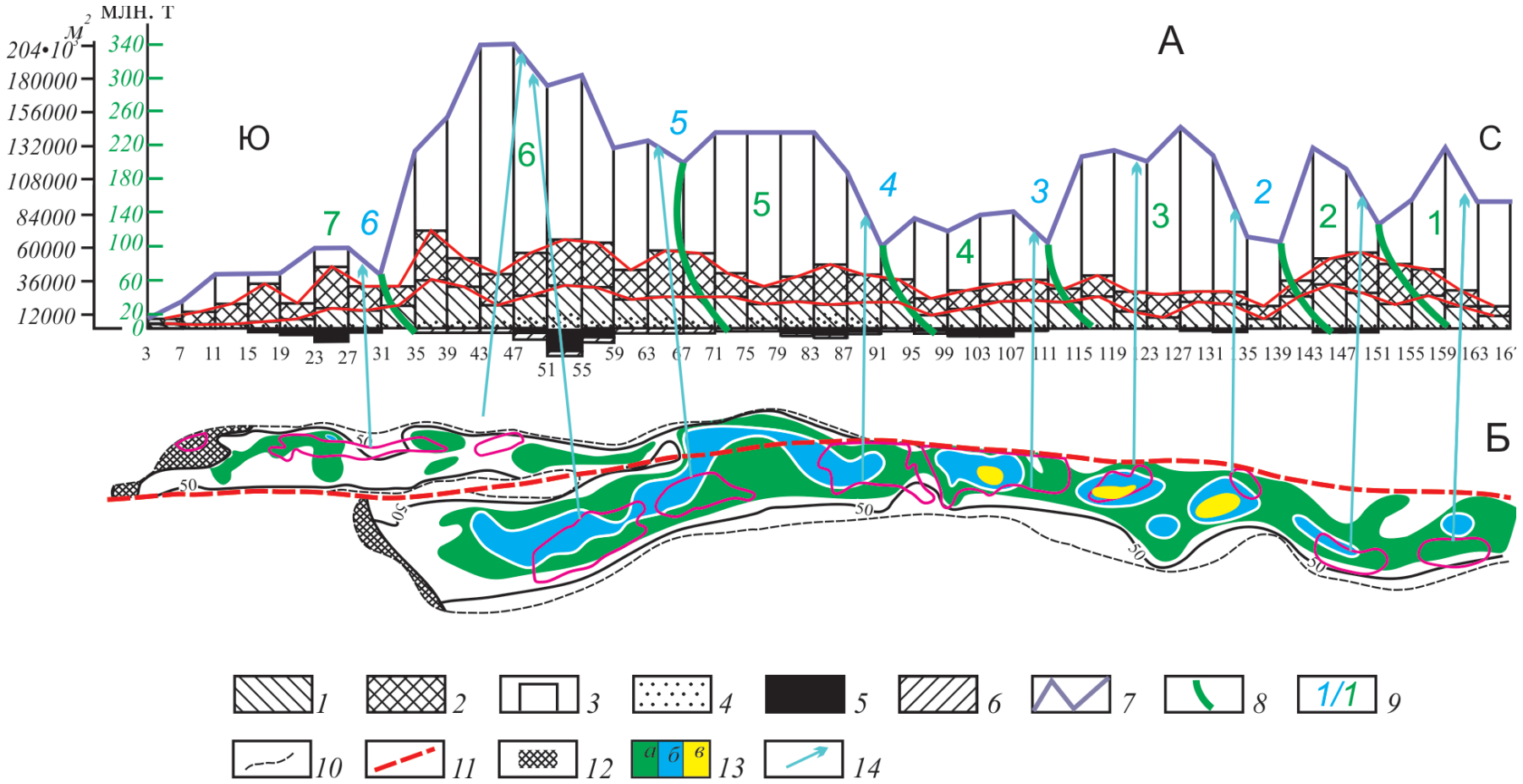


Рис. 4. Изменение площади поперечного сечения (А) [4] и мощности (Б) [10] Талнахского интрузива по его длине:

1 – такситовый и контактовый габбро-долериты; *2* – пикритовый габбро-долерит; *3* – безрудные дифференциаты (оливиновый, оливинсодержащий, безоливиновый габбро-долериты и габбро-диорит); *4* – вкрапленные руды в интрузиве; *5* – массивные руды; *6* – экзоконтактовые вкрапленные руды; *7* – линия изменения площади поперечного сечения интрузива; *8* – условные границы «магматических камер»; *9* – номера «пережимов» (синие) и «камер» (зеленые), по оси ординат – площадь поперечного сечения и масса пород и руд (зелёное) в каждом ограниченном блоке, по оси абсцисс – номера разведочных линий (профилей), расстояние между которыми составляет 400 м; *10* – контур Талнахского интрузива; *11* – Норильско-Хараелахский разлом; *12* – выход интрузива по рыхлыми отложениями; *13* – участки интрузива мощностью, м: *а* – 100, *б* – 150 и *в* – 200; *14* – линии, указывающие приуроченность залежей массивных руд к местам перехода суженных в расширенные участки

3. Отношения объёмов, мощностей и масс экзоконтактовых роговиков рудоносных и слаборудоносных интрузий Талнахского рудного поля

Интрузии	П:А:М	Ки	Мс
Талнахская	5:4:1	1,5–2,0	9,8/5,3
Хараелахская	5:4:1	1,5–2,5	
Нижнеталнахская	1:6:3	0,6–1,0	

Примечание. П:А:М – отношение объёмов пироксен-, амфибол- и мусковит-роговиковой фаций в метаореоле; Ки – критерий Ингерсола: отношение мощностей метаореола (сумма спуррит-мервинитовой – СМ, 1000°С, пироксеновой – П, 900°С, амфиболовой – А, 750°С и мусковитовй – М, 450°С фаций) и интрузива [10]; Мс – отношение масс метаореола (роговиков) и интрузива, млрд. т [4].

Например, к ним могут относиться Бушвельдский магматический комплекс с его большими массами позднее внедрённого красного гранита, а также куполообразные гранитоиды южного обрамления Печенгской структуры.

Рассмотренные условия отличаются от одноактного поступления магмы в конечные камеры внедрения (свойственного безрудным силлам и слаборудоносным интрузиям нижненорильско-нижнеталнахского типа), когда соприкосновение магматического расплава с относительно холодной вмещающей средой приводит к быстрому его отвердеванию (кристаллизации) с образованием на контакте закалённой зоны [4, 7]. Она отгораживает магматический объём от окружающей среды, практически полностью изолируя его от существенного проникновения каких-либо внешних веществ.

Таким образом, «вставленный» вид является характерной особенностью рудоносных интрузий Норильского района, которая может использоваться в поисковой практике. Она обусловлена повышенной плотностью, высокой температурой и субгоризонтальным проникновением магмы, обеспечивающими её однонаправленное внедрение, продольную конвекцию расплава, плавление и удаление материала вмещающих пород, скопление рудного вещества.

Аномальные объёмы, мощности и массы метаморфических образований рудоносных интрузий, резко отличающиеся от близких по составу слаборудоносных и безрудных интрузивов. Рудоносным интрузиям свойственно превышение объёма, мощности и массы экзоконтактовых образований по отношению к магматическому телу, а слаборудоносным и безрудным – наоборот, что особо важно в поисковом деле. Так, например, у рудоносной Хараелахской интрузии в участках её мощности от 50 до 100 м мощность только роговиков верхнего экзоконтакта составляет 150–200 м (рис. 3, А, Б). А у расположенного здесь же (в этих же вмещающих толщах) слаборудоносного Нижнеталнахского интрузива при его мощности до 400 м общая мощность экзоконтактовых метаморфитов не превышает 40 м (см. рис. 3, В, Г). В Талнахском интрузиве при его общей массе ~5,3 млрд. т суммарная масса роговиков верхнего и нижнего экзоконтактов составляет ~9,8 млрд. т [4]. Эта закономерность проявлена и в обобщённых данных (табл. 3).

Наблюдается явное превышение энергетических затрат на преобразование вмещающей среды в случае рудоносных интрузий по сравнению со слаборудоносными и безрудными. В чём же причина таких различий?

Состав, объём, мощность и вмещающая среда обоих видов магматических тел практически одинаковы (см. табл. 4 и рис. 3). Сформировавшие их магмы не могли существенно разниться по *P-T* параметрам и потому имели близкие энергетические и физические свойства. Соответственно, они должны были оказывать однотипное воздействие на окружающие толщи.

Допущение большей насыщенности рудоносных интрузий флюидами не имеет подтверждений. Главные экзоконтактовые породы – роговики спуррит-мервинитовой (1000°С) и пироксеновой (900°С) фаций – являются продуктами «сухого» термического воздействия (см. табл. 3). К тому же есть основание считать, что в Нижнеталнахском интрузиве могло быть больше флюидов. На это указывают химические анализы его пород, показывающие высокие содержания воды, превышающие почти в два раза её количество в рудоносной Хараелахской интрузии (см. табл. 4). Показательны также отсутствие у слаборудоносных интрузий роговиков высокотемпературной спуррит-мервинитовой фации и резкое преобладание водосодержащей мусковитовой фации (см. табл. 3). Снижению энергетических возможностей интрузий нижнеталнаского типа могла

4. Химический состав Хараелахской (1) и Нижнеталнахской (2) интрузий. *По работе* [2]

Компоненты	1	2
SiO_2	44,16	44,69
TiO_2	0,70	0,79
AL_2O_3	14,65	12,99
Cr_2O_3	0,05	0,01
Fe_2O_3	3,49	2,63
FeO	9,24	8,37
MnO	0,20	0,19
MgO	11,67	13,75
CaO	9,39	9,07
Na_2O	1,84	1,51
K_2O	0,61	0,76
P_2O_5	0,09	0,12
П.П.П.	2,95	4,43
Сумма	99,63	99,31

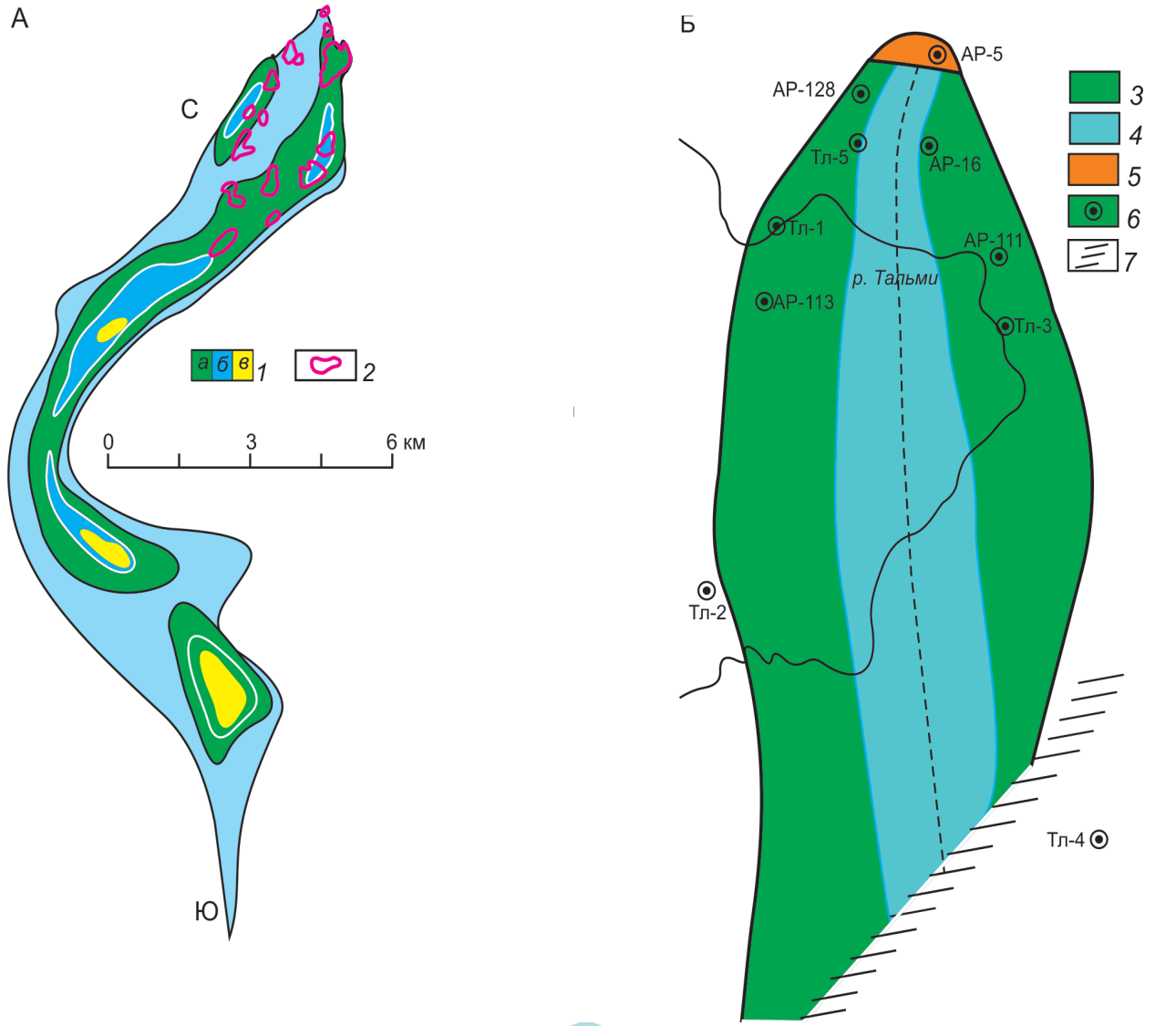


Рис. 5. Интрузия Норильск I (А) и Западная ветвь Тальминской интрузии (Б) [10]:

А – изменение мощности и распределение рудного вещества по длине интрузива: *1* – участки с мощностью (в м): *а* – 100, *б* – 200 и в – 300; *2* – контуры массивных руд; Б – размещение поисковых скважин: *3* – интрузивное тело; *4* – предполагаемая площадь распространения пикритового горизонта с осевой линией интрузива; *5* – выход интрузива под рыхлые отложения; *6* – буровые скважины; *7* – зона Тальминского разлома

способствовать значительная кристаллизация их магмы до поступления в конечные камеры внедрения (для этого допущения имеются некоторые основания), но не до тех величин, которые наблюдаются в реальности, так как кристаллизационное тепло в большей части сохраняется до завершения процесса кристаллизации всего объёма магмы.

Причина пониженной энергетической возможности нижненорильско-нижнеталнахских интрузий могла состоять в том, что их магма была более низкотемпературной, чем магма рудоносных интрузий. Этим интрузиям свойственны исключительно низкие содержания хрома (69 г/т против 165 г/т для рудоносных интрузий) и металлов платиновой группы (0,4 г/т против 18,96 г/т). Такие содержания характерны для пироксенитов. Они указывают на иной источник магмы данных интрузивов. Она могла зарождаться за счёт пироксеновой составляющей мантии, в том числе за счёт «пироксенового пиролита». В разрезе мантии он занимает более высокую позицию и имеет более низкую температуру

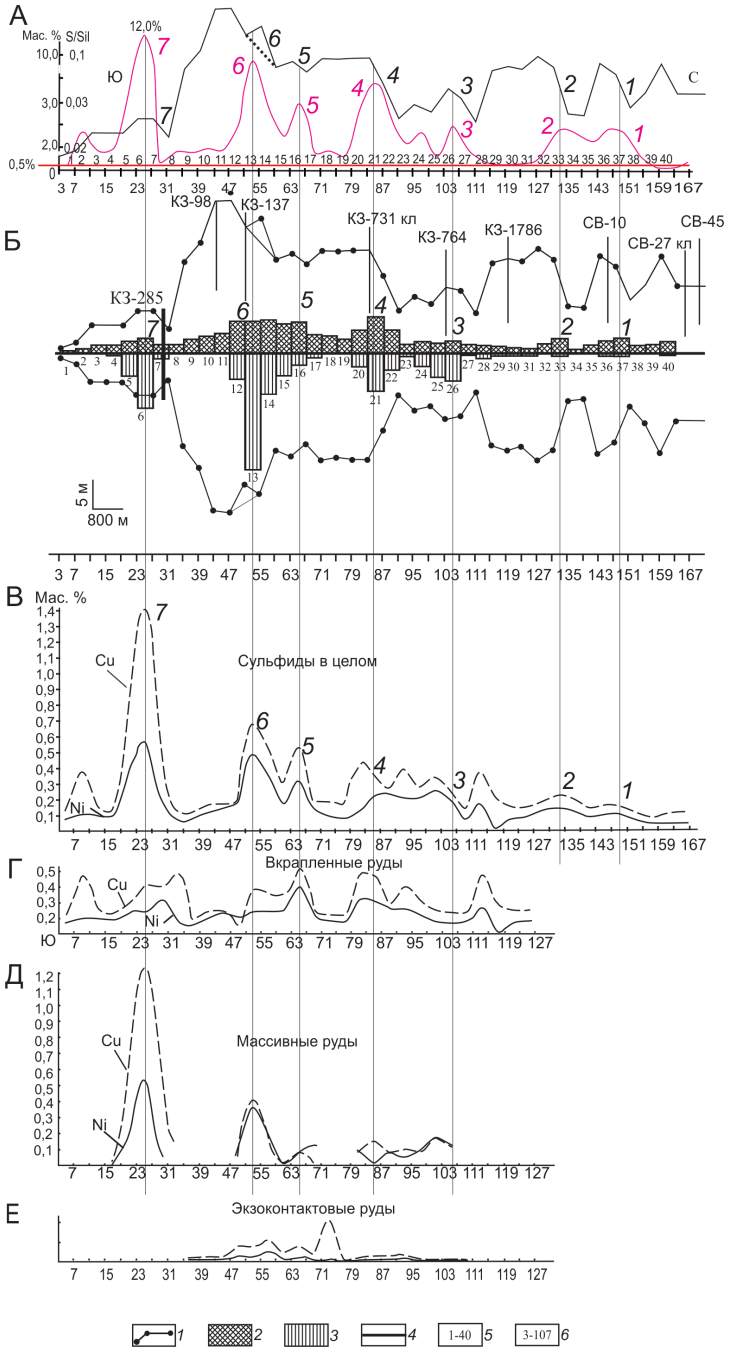


Рис. 6. Распределение рудного вещества по длине Талнахского интрузива:

А – изменение соотношения масс сульфидного и силикатного вещества (красная кривая с номерами пиков) и площади поперечного сечения интрузива (чёрная кривая с номерами мест перехода суженных в расширенные участки), по оси ординат – отношения масс, по абсцисс: над чертой – номера линий разведочного бурения, под чертой – номера разведочных блоков; сквозные вертикальные линии фиксируют общую приуроченность скоплений рудных веществ к местам перехода суженных в расширенные участки интрузива; Б – изменение площади поперечного сечения и распределение масс сульфидов вкрапленных и массивных руд Талнахского интрузива (проекция на вертикальную плоскость; В–Г – распределения никеля и меди в общей магматической массе; *1* – контур магматического тела, приведённого к форме трубы (диаметр максимального сечения на линии 47 составляет около 511 м); *2* – масса вкрапленных сульфидов в интрузиве; *3* – масса сульфидов массивных и экзоконтактовых руд; *4* – условная осевая линия интрузива; *5* – номера разведочных блоков (ширина блоков 400 м); *6* – номера разведочных линий; КЗ-285 – номера разведочных скважин; внутри рисунков (1–7) номера переходов суженных в расширенные участки интрузии; красные цифры – номера пиков отношений сульфид/силикат

плавления, чем нижележащая оливиновая (перидотитовая) мантия, являющаяся источником рудоносных магм. В таком случае магма нижненорильских-нижнеталнахских интрузий должна зарождаться и внедряться раньше, чем магма рудоносных интрузивов (предварять появление последних), что проявлено в их реальном соотношении. Следовательно, нижненорильско-нижнеталнахские интрузии могут использоваться в качестве указателя на возможность нахождения в поле их развития рудоносных интрузивов, как это наблюдается в действительности.

Свойственные рудоносным интрузиям экзоконтактовые преобразования возможны при длительном поступлении во вмещающую среду стабильно высокотемпературного (≥1000°С) теплового потока, постоянно поддерживающегося «свежей» магмой. В случае большого объёма магматических масс типа Бушвельдского комплекса поступление тепла в основном осуществляется конвекцией магматического расплава от внутренних (центральных) частей резервуара к его краям. А при малых объёмах типа Норильских рудоносных интрузий – продольной конвекцией магмы. В них она постоянно доставляет «свежий» высокотемпературный расплав в головные части магматической колонны и тем самым обеспечивает длительный высокотемпературный нагрев вмещающей среды. При одноактном поступлении магмы в конечные камеры внедрения её конвекция ограничена и изменение вмещающей среды соответствует возможностям теплового запаса одноактной порции магматического расплава. Именно этот вариант свойственен слаборудоносным и безрудным интрузиям.

«Импульсивное» изменение площади поперечного сечения, мощности и массы интрузий по их длине. Изменение площади поперечного сечения по протяжённости рудоносной части интрузивов выражено в чередовании сравнительно коротких суженных участков («пережимов») с более протяжёнными расширенными («камерами»). Оно напоминает чередование ёмких углублённых частей (омутов) с мелкими и короткими участками (перекатами) обычно небольших равнинных рек (см. рис. 2, Ж), профиль дна которых определяется глубиной вымывания водным потоком подстилающих пород.

В Талнахском интрузиве на протяжении 17,2 км выделяется шесть пережимов протяжённостью 100–400 м и семь расширений – камер длиной 800–1600 м (рис. 4, А). В пережимах площадь поперечного сечения меняется от 60 до 130 тыс. м^2, а в расширениях – от 84 до 204 тыс. м^2. Переход суженных в расширенные участки обычно совершается довольно резко, достигая двукратного и большего увеличения площади поперечного сечения на расстоянии порядка 400 м (см. рис. 4, А) и 50 м уступа по высоте на 100 м длины (см. рис. 4, Б). Соответственно, по длине интрузива изменяется его масса (см. рис. 4, А) при общем её увеличении в направлении фронта интрузии (с севера на юг) и наибольшем скоплении в предфронтальной части (профили 35–59).

Изменение площади поперечного сечения интрузива (см. рис. 4, А, Б) происходит, во-первых, за счёт изменения его ширины, во-вторых – мощности («высоты»), а в-третьих – того и другого. Увеличение сечения за счёт ширины приводит к рассредоточению массы и уменьшению мощности кумулятивного горизонта (Гп) и рудного вещества (см. рис. 4, А, Б, линии 43 и 127), тогда как увеличение за счёт мощности – к их большему концентрированию, размещению на меньшей площади по сравнению с увеличением сечения за счёт ширины интрузива (см. рис. 4, А, Б, линии 83 и 107).

Наблюдаемое изменение площади поперечного сечения по длине интрузива свидетельствует о неравномерном («импульсивном») и поэтапном поступлении магмы в конечную камеру её внедрения. Причиной тому могли быть чередование периодов накопления магмы в питающем очаге до критических значений по давлению и поэтапный подъём её в вышележащие толщи. Они приводят к прорыву фронтальной камеры и дальнейшему продвижению магматического расплава (подобные перерывы в поступлении магм и её прорывы во вмещающих толщах свойственны всем известным палео- и современным вулканам). И чем длительнее происходит накопление в питающем очаге критических величин, тем более объёмными становятся фронтальные камеры внедрения из-за более продолжительной (неостанавливающейся) циркуляции (конвекции) магмы и большего выноса из них материала вмещающих толщ обратным потоком.

Пережимы могут представлять собой участки прорыва магмы из расширенной камеры во время достижения в ней сверхкритических величин по давлению. После этого снова наступает спокойное состояние, когда продольно циркулирующая магма «вырабатывает» новое расширенное пространство. И так до следующего достижения критического давления и последующего нового прорыва, пока не иссякнут «силы» магматического очага для обеспечения продвижения интрузива вперёд.

Пережимы и расширения магматического канала меняют скорость течения в них магмы, приводят к изменению мощности и массы дифференциатов интрузива и способствуют накоплению рудного вещества. При этом кумулятивные минералы (в основном оливин) и рудное вещество (частицы сульфидного расплава) оседают и накапливаются преимущественно в интервалах снижения скорости течения магмы, а именно, в переходах суженных в расширенные участки, как это наблюдается в реальности (см. рис. 4).

На рис. 4, А видно, что наибольшему изменению подвержена безрудная часть интрузива – горизонты Го+Гос+Гбо и Гд. За счёт неё проявлены резкие колебания в поперечном сечении интрузивного тела, как и образование в нём пережимов. Рудоносные горизонты

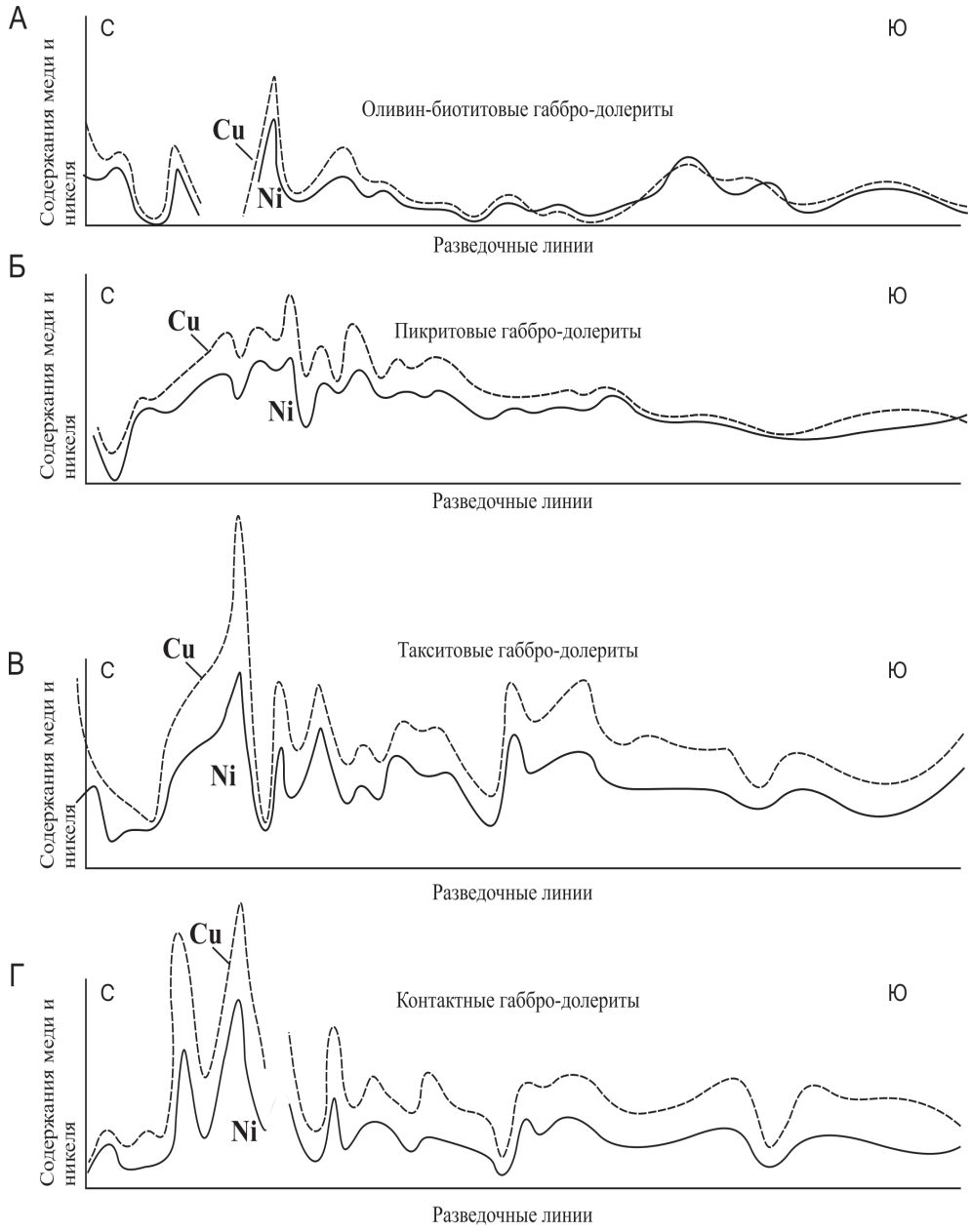


Рис. 7. Изменение средних содержаний меди и никеля по разведочным линиям западной ветви месторождения Норильск I. *По работе* [8]

(Гп, Гт и Гк) характеризуются меньшими, но более частыми колебаниями масс. Причём их увеличение и уменьшение обычно не совпадают с таковыми безрудных дифференциатов и интрузива в целом. Это может указывать на то, что накопление кумулятивных минералов и рудного вещества в рудоносных горизонтах в основном происходило не из выше находящегося стационарного объёма магмы, а из проходящего (конвектирующего) и обновляющегося её потока. По завершении конвекции за счёт остановившей движение магмы сформировались верхние безрудные горизонты интрузий (Го+Гос+Гбо и Гд) и их кумулятивный продукт – сравнительно маломощный оливин-биотитовый горизонт (Гоб), несколько обогащённый оливином и содержащий небогатую сульфидную минерализацию.

Большее изменение площади поперечного сечения безрудных горизонтов могло быть связано с тем, что они кристаллизовались в основном на стадии прекращения продольной циркуляции магмы, по существу в стационарных условиях завершали становление интрузива, заполняя собой все неровности, оставшиеся от предшествующих динамичных процессов.

Таким образом, отсутствие чётких прямых соотношений в распределении масс и мощности рудоносных горизонтов и вышележащей безрудной части интрузива свидетельствует о том, что формирование первых не имело определяющей зависимости от последней, и что оно происходило не в стационарных, а в динамических условиях. Собственное (более частое) колебание в распределении масс рудоносных горизонтов указывает на их образование из «волновых» потоков магматического расплава, последовательно сменяющихся многократными новыми поступлениями магмы.

В случае одноактного внедрения расплава в магматическую камеру происходит стационарное становление интрузивных массивов, приводящее к сравнительно равномерному (соответствующему мощности магматического слоя) накоплению кумулятивных минералов и рудных масс. Это свойственно известным в Норильском районе сульфидоносным интрузиям нижненорильско-нижнеталнахского типа.

Увеличение мощности рудоносных интрузий в основном осуществляется за счёт углубления их нижней границы, выраженного «исчезновением» подстилающих пород рамы (см. рис. 1, разрезы Б-1, В-1, В-2, Д-1). Эти углубления пунктирно трассируются в «фарватере» интрузива на фоне его практически повсеместной и непрерывной 100-метровой мощности (см. рисунки 4, Б и 5, А).

Пунктирное распределение углублений по длине интрузива может соответствовать остановкам в продвижении магматической колонны, а их образование обусловливаться длительной конвекцией магмы на остановках (в одном месте), обеспечивающей значительный вынос корового материала и формирование пространства для ёмких магматических камер – расширенных участков интрузий.

Направленность и ориентация углублений отражают нахождение фарватера магматического потока. А наличие их свидетельствует о возможности накопления в интрузиве промышленных залежей руд. Именно к ним тяготеет наибольшее скопление руд в известных рудоносных интрузиях Норилского района.

Отмеченные закономерности реально существуют и контролируют рудоносность магматических тел. Выявление и использование их в прогнозно-поисковых целях могут обеспечить полноту и надёжность оценки продуктивности перспективных площадей. В Норильском районе ещё остаются недооценённые территории и объекты, поисковые работы на которых проводились без учёта этих закономерностей. В качестве примера можно привести северную часть Хараелахской мульды. Выявленную здесь Западную ветвь Тальминской интрузии норильского типа исследовали так, что все скважины разместились в краевых частях интрузива (см. рис. 5, Б). В результате перспективный массив остался практически неизученным в отношении его рудоносности.

Неравномерное распределение рудного вещества по длине интрузивов. Рудоносным интрузиям Норильского района свойственно неравномерное, но вполне закономерное, распределение и изменение количества и состава рудного вещества вдоль их протяжённости: наибольшее накопление его приурочено к фронтальным и предфронтальным частям интрузивов, а по длине интрузивных тел – к местам перехода суженных в расширенные участки (см. рисунки 1, А–Д, 4 и 6). Изменение проявляется во всех составляющих: в общей рудной (сульфидной) массе, в типах руд и в количестве рудных компонентов – в минеральном и химическом составах [4]. Данные закономерности являются «завершающим» поисковым признаком, обеспечивающим обнаружение уже конкретных рудных тел.

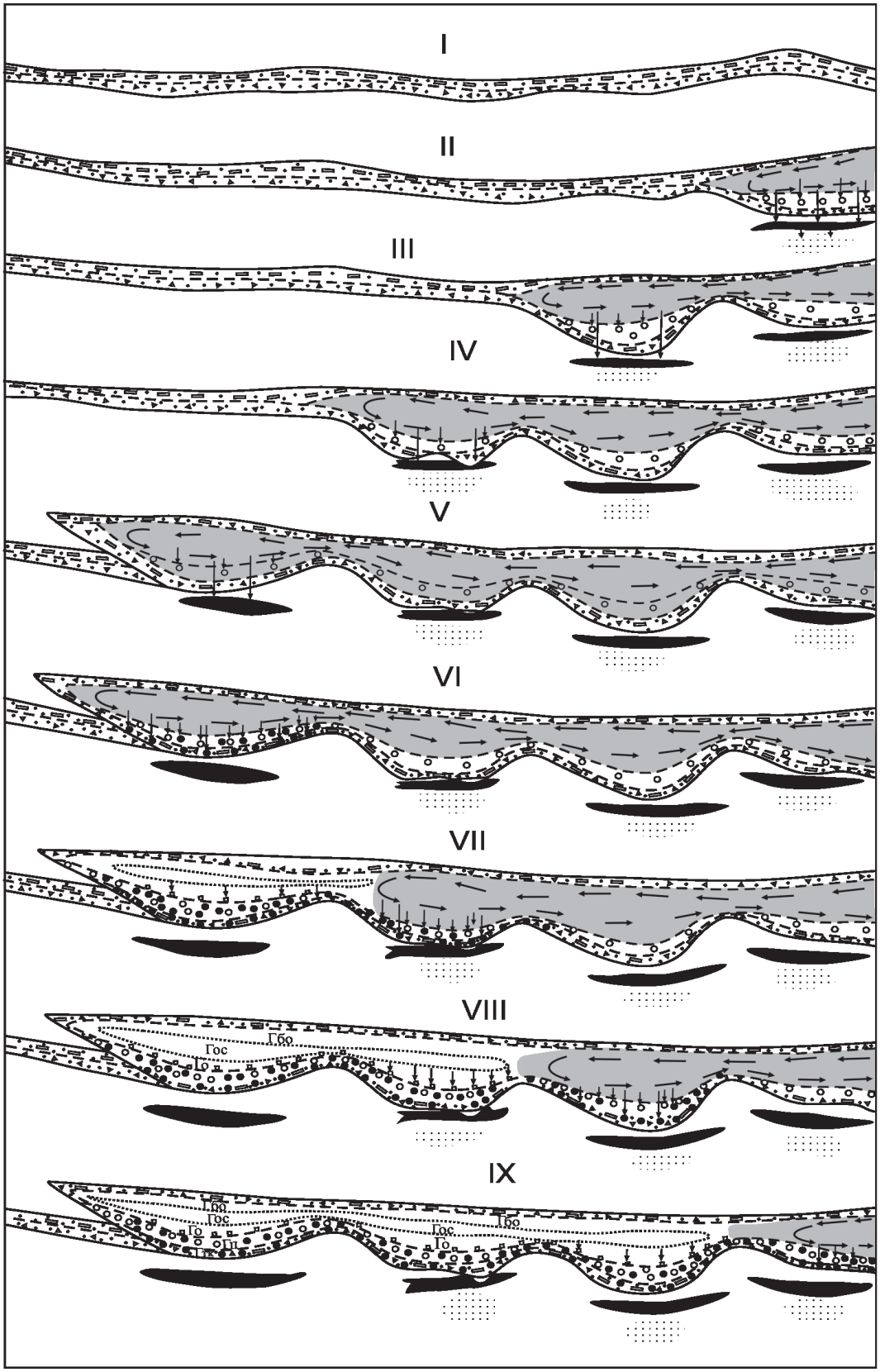
Изменение количества сульфидного вещества в отношении к силикатной массе по длине Талнахского интрузива показано на рис 6. А. Оно колеблется от ≤0,01 (1,0 мас.%) до 0,12 (12,0 мас.%). Проявлено семь основных максимумов. Практически каждый из них расположен в переходе суженного в более расширенный участок интрузии по направлению внедрения и течения магмы.

Изменения по типам рудного вещества отображены на рис. 6, Б. Максимумы скопления массивных руд совпадают с максимумами вкрапленных сульфидов, и вместе они приурочены к переходам суженных в расширенные участки. И те, и другие не проявляют чёткой зависимости от масс Гп, Гт и Гк, но эпизодически совпадают с ними (см. рис. 4, А). Нет их прямой связи и с безрудными дифференциатами.

На рис. 4, Б видно, что нахождение массивных руд «соседствует» с участками максимальной мощности интрузивов, фиксирующими собой места их углубления. Имеющиеся отклонения от них могут быть связаны

Рис. 8. Схема формирования рудоносных интрузий и связанных с ними платино-медно-никелевых месторождений талнахского типа:

1 – головная кашеобразная часть магматической колонны; *2* – верхние и нижние контактовый и такситовый габбро-долериты; *3* – внедряющаяся и циркулирующая магма; *4* – фенокристы оливина; *5* – выделения сульфидной жидкости; *6* – оливин, выделяющийся при внутрикамерной кристаллизации магмы; 7 – массивные руды; *8* – экзоконтактовое вкрапленное и прожилково-вкрапленное оруденение; *9* – кристаллизующаяся магма; *10* – направления движения кристаллов оливина и выделений сульфидной жидкости; I–IX – этапы внедрения и становления рудоносных интрузий и накопления рудного вещества


I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
Гос
Гбо
IX
Гбо
Гос
Го
Гп
Гос
Го
Гбо
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

с большой возможностью растекания (миграции) тяжёлой сульфидной жидкости (расплава) от места её первичного накопления.

Наибольшее скопление массивных руд (см. рисунки 4, А и 6, Б) более чем в 3 раза превышает максимальную концентрацию вкрапленных в интрузиве сульфидов и приходится на предфронтальную часть интрузии, совпадая с максимумами концентрации вкрапленных в интрузиве и экзоконтактовых сульфидов. Таким образом, здесь проявлено абсолютное накопление (по всем типам руд) сульфидного вещества.

Наблюдаемое распределение сульфидного вещества свидетельствует о независимости накопления массивных и экзоконтактовых руд от сульфидов, вкрапленных в интрузиве, и указывает на частичное перемещение их из массивных в экзоконтактовые руды.

Распределение и изменение содержаний рудных компонентов (Ni и Cu) по длине интрузий показаны на рисунках 6, В–Е и 7 (аналогичные сведения о других элементах – Co, Pt, Pd, Rh и Au – имеются в работе [4]). Видно осцилляционное распределение и увеличение содержаний никеля и меди от тыловых к фронтальным частям интрузий: с севера на юг в Талнахском (см. рис. 6, В) и с юга на север в Норильском (см. рис. 7) интрузивах. Причём это увеличение коррелируется с увеличением в том же направлении общей массы рудного вещества (см. рис. 6, А, Б) при резком повышении в пиках (максимумах) содержания меди по отношению к никелю (см. рис. 6, В).

В Талнахской интрузии проявлено семь основных пиков содержания меди и никеля, каждый из которых соответствует повышенному количеству рудного (сульфидного) вещества (см. рис. 6, А, Б), приуроченному к местам перехода суженных в расширенные участки интрузива. Наиболее резкое увеличение содержания меди (см. рис. 6, В, пик 7) происходит в основном за счёт богатых Cu массивных руд (см. рис. 6, Д), которые резко отличаются по этому показателю от двух более северных залежей сплошных сульфидов, весьма бедных медью. Создаётся впечатление, что южный («головной») участок (пик 7) обогатился медью за счёт двух более северных (относительно тыловых) участков интрузива.

Подобная картина («сгон» меди от тыловых к фронтальным частям интрузива) характерна и для интрузии Норильск I (см. рис. 7). Здесь она выражена в изменении содержания меди по рудным горизонтам (Гоб, Гп, Гт и Гк) как вдоль их протяжённости, так и в вертикальном разрезе.

Существует общая закономерность, свойственная Pt-Cu-Ni месторожденям. Сульфидное вещество практически во всех своих выделениях дифференцировано в направлении от бедных к богатым медью разновидностям. Это связано с большим температурным и временным интервалом кристаллизации исходного сульфидного расплава (от ~1100 до ~850°C), предкристаллизационным его разделением на относительно высокотемпературную, богатую железом («пирротиновую») и низкотемпературную, богатую медью и минералами платиновой группы (МПГ) («халькопиритовую») жидкости и более ранней (опережающей) кристаллизацией пирротина, позволяющей медистой фракции мигрировать на малые и большие расстояния [4]. Дифференциация сульфидов в вертикальном разрезе интрузива и подстилающих пород вполне понятна. Она связана с более длительным нахождением медистой составляющей сульфидов в жидком состоянии и её миграцией вниз под действием силы тяжести. Но их перемещение и фракционирование по горизонтали, вдоль интрузива и на большие расстояния, возможно лишь совместно с силикатным расплавом, находясь в нём в рассеянном (диспергированном) состоянии [4, 7]. Тем не менее, причина и этого фракционирования остаётся прежней. Она состоит в большом температурном интервале кристаллизации сульфидного расплава, обеспечивающем накопление меди в остаточной низкотемпературной фракции и длительное нахождение последней в жидком состоянии.

Этот процесс может приводить к накоплению меди (а также ассоциирующих с ней МПГ и Au) во фронтальной части магматической колонны путём переноса их (концентрирующихся в остаточном сульфидном расплаве) из тыловой части колонны конвектирующим потоком магмы.

В рудоносных интрузивах обогащение сульфидов медью (см. табл. 1) всегда сопровождается увеличением в них содержания МПГ [4]. Этот факт является исключительно важным поисковым признаком, так как медистые сульфиды безрудных интрузий практически всегда бедны платиноидами.

В обобщённом виде условия внедрения и становления рудоносных интрузий в конечных камерах отображены на рис. 8.

В головной части поднимающегося магматического столба накапливались протокристаллы плагиоклаза [4, 7]. При внедрении магматической колонны в субгоризонтальном направлении за счёт её головной части образовалась периферическая часть интрузива – силл лейкократового габбро, содержащий первичную платино-медно-никелевую минерализацию (см. рис. 8, позиция I).

Затем в ещё не полностью застывший лейкократовый силл внедрялась последующая часть магматической колонны (позиция II). Она имела более высокую температуру, чем фронтальная часть (~1300°C), и содержала протокристаллы оливина и хромита. Внедрение её осуществлялось в одном направлении, поэтапно, с остановками, которые зафиксированы в виде расширенных участков (камер) интрузива. При внедрении тыловой части колонны лейкократовая составляющая силла, обогащённая протокристаллами плагиоклаза, преимущественно отжималась к верхнему эндоконтакту. Здесь она образовывала фрагментарные тела лейкокра-

тового габбро и верхнего такситового габбро-долерита, в которых к первичной сульфидной минерализации добавилась наложенная, обогащённая металлами платиновой группы. Меланократовая же часть силла участвовала в образовании такситового и контактового горизонтов основного тела интрузии.

Поэтапное внедрение колонны (позиции III–V) сопровождалось циркуляционным движением расплавной жидкости от тыловых к фронтальным частям магматического канала и обратно. Последнее обусловливало накопление частиц сульфидной жидкости и протокристаллов оливина преимущественно в области замыкания циркуляционной ячейки, где происходило наибольшее понижение температуры, и в местах перехода от суженных к расширенным участкам из-за снижения скорости течения магмы.

Частицы сульфидной жидкости, укрупняясь с понижением температуры, по мере продвижения магматической колонны вперёд оседали и проникали в подстилающие интрузив породы через слой контактового и такситового габбро-долеритов. В результате скопления этих частиц образовались сплошные залежи сульфидных руд и экзоконтактовые прожилково-вкрапленные руды.

После прекращения продвижения магматической колонны вперёд (позиция VI) наступал длительный период общей продольной циркуляции магмы по всей длине субгоризонтального магматического канала с замыканием потока в самой удалённой (фронтальной и предфронтальной) его части. Здесь происходило максимальное накопление сульфидного вещества.

Со временем фронтальная часть канала настолько остывала и затвердевала, что теряла возможность участвовать в продольном циркуляционном движении. Замыкание ячейки поэтапно отступало назад вплоть до тыловой части субгоризонтального, а затем и субвертикального канала (позиции VII–IX).

Сульфидное вещество, оседавшее на стадии отступления циркуляционной ячейки, накапливалось в нижних, существенно консолидированных горизонтах интрузива – в контактовом, такситовом и пикритовом габбро-долеритах, формируя тем самым вкрапленные в интрузиве руды.

В связи с тем, что конфигурация сечения интрузива формировалась в основном на стадии его продвижения вперёд, наибольшее оседание сульфидов происходило в тех же местах – на переходах от суженных к расширенным участкам. Именно этим объясняется совпадение мест увеличения концентрации сульфидов как во вкрапленных в интрузиве, так и в экзоконтактовых и массивных рудах.

Состояние сульфидов, транспортируемых магмой, определяется как гомогенный сульфидный расплав [4]. С охлаждением, в предкристаллизационный период, гомогенный расплав распадался на богатую железом («пирротиновую») и богатую медью («халькопиритовую») жидкости, кристаллизующиеся не одновременно, в широком температурном интервале – от 1190 до 1150°С и от 1150 до 850°С, соответственно.

Изменение состава руд, выражающееся в повышении содержания меди, палладия, платины и золота к фронтальной части интрузива, объясняется переносом («сгоном») наиболее легкоплавкой и подвижной медистой части сульфидного вещества, обогащённой металлами платиновой группы и золотом, из тыловых во фронтальные части интрузии на стадии общей продольной циркуляции магмы.

Локальная неоднородность состава сульфидного вещества, проявленная в многочисленных чередованиях по длине интрузива обогащённых и обеднённых цветными и благородными металлами участков, обусловлена миграцией медистой фракции сульфидного расплава, кристаллизующейся на ≥200°С ниже, чем железистая («пирротиновая») фракция. При этом временной разрыв в их затвердевании может составлять многие сотни лет в зависимости от скорости остывания системы.

Наибольшая длительность нахождения в жидком (подвижном) состоянии свойственна медистой фракции вкрапленных в интрузиве руд. Перемещение медистой жидкости обусловливается тектоническими подвижками и уменьшением («усыханием») магматического объёма при переходе системы от жидкого к твёрдому состоянию.

Таким образом, с помощью процесса продольной магматической циркуляции могут быть объяснены наблюдаемые особенности и закономерности, присущие норильским рудоносным интрузиям и связанным с ними платино-медно-никелевым месторождениям. При этом формулируется важный в практическом отношении вывод: чем больше было циркуляционных циклов в рудоносном интрузиве, тем больше накапливалось в нём рудного вещества. Циркуляционные циклы приводили к накоплению не только рудного вещества, но и тепловой энергии, отражённой в метаморфизме вмещающих пород. Следовательно, чем больше масса и мощность контактовых роговиков вокруг рудоносного интрузива, тем он богаче рудным веществом.

Рассмотренные особенности и закономерности позволяют сформулировать в упрощённом варианте оптимальную последовательность выполнения геологоразведочных работ в ходе поисков Pt-Cu-Ni месторождений: 1) выделение магматического поля с проявлениями лейкократового габбро; 2) выявление в нём перспективного интрузивного тела, вытянутого в одном направлении; 3) выяснение наличия в этом теле неравномерного распределения магматических масс, выраженного в чередовании по длине интрузива суженных с расширенными (сравнительно мощными, углублёнными в подошве) участками; 4) детальное опоискование мест перехода суженных в расширенные участки; 5) нахождение в них наибольших скоплений рудных веществ.

Территория Норильского района остаётся недостаточно изученной в отношении обнаружения новых платино-

медно-никелевых месторождений. Изложенные в статье данные могут способствовать решению этого вопроса.

Основные результаты и выводы состоят в следующем.

1. Выделены и охарактеризованы специфические особенности и закономерности рудоносных интрузий Норильского района, абсолютные в своём проявлении и определяющие в применении независимо от объяснений их происхождения.

2. Обоснованы и описаны возможные причины существования выделенных особенностей и закономерностей. Главными из них являются специфичные условия поступления сульфидоносных магм в конечные камеры внедрения и становления в них магматических тел.

3. Специфика поступления магм состояла в их импульсивности и продольной конвекции, обеспечивающих многократную смену свежих порций магматического расплава, приводящую к обогащению сульфидным веществом фронтальной и предфронтальной частей рудоносных массивов.

4. Показана целесообразность применения выделенных особенностей и закономерностей в прогнозно-поисковых целях.

5. Полученные данные позволяют выполнить анализ опоискованности Норильского района и определить возможность выявления в нём новых Pt-Cu-Ni месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973.
2. *Геология* и рудоносность Норильского района / О.А.Дюжиков, В.В.Дистлер, Б.М.Струнин и др. – М.: Наука, 1988.
3. *Лихачев А.П.* Роль лейкократового габбро в формировании норильских дифференцированных интрузий // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1965. № 10. С. 75–89.
4. *Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М.: Эслан, 2006.
5. *Лихачев А.П.* К вопросам образования, поведения и фракционирования химических элементов, их изотопов и минералов в природных процессах // Отечественная геология. 2017. № 6. С. 80–93.
6. *Лихачев А.П.* Непроизвольная сущность геологических и других природных процессов и определяющая роль воды в их проявлении // Отечественная геология. 2018. № 6. С. 67–76.
7. *Лихачев А.П.* Возможность самообогащения рудным веществом и тяжелым изотопом серы (^{34}S) мантийных магм, формирующих платино-медно-никелевые месторождения и перспективное место для локализации руд в Норильском районе // Отечественная геология. 2019. № 3. С. 32–49.
8. *Роговер Г. Б.* Месторождение Норильск I. – М.: Госгеолтехиздат, 1959.
9. *Служеникин С.Ф.* Малосульфидное платиновое оруденение в дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивах Норильского района // Автореф. дис. … канд. геол.-минер. наук. – М.: ИГЕМ РАН, 2001.
10. *Туровцев Д.М.* Контактовый метаморфизм норильских интрузий. – М.: Научный мир, 2002.
11. *A proton-microprobe* study of magmatic sulfide ores from the Noril'sk-Talnakh district, Siberia // G.K.Czamanske, V.Ye.Kunilov, A.P.Likhachev et al. // Can. Mineral. 1992. Vol. 30. P. 249–287.
12. *Likhachev A.P.* Ore-bearing intrusions of the Noril'sk region // Proceedings of the Sudbery Noril'sk symposium. Ontario. 1994. Special vol. 5. P. 185–201.

Журнал «Отечественная геология» принимает участие в геологических конференциях, совещаниях, съездах в качестве информационного партнёра, освещая на своих страницах важные события отрасли.

Приглашаем к сотрудничеству представителей геологических, горно-геологических, горнодобывающих организаций и предприятий, отраслевых научно-исследовательских, академических и образовательных институтов по вопросам размещения рекламы или издания целевого номера.