

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В СУЛЬФИДНЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУДАХ ЕЛАНСКОГО ТИПА МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Статья 2. Геолого-генетическая природа рудномагматической системы еланского типа и механизм фракционирования в рудах металлов платиновой группы

Член-корр. РАН Н. М. Чернышов, М. Н. Чернышова

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 15 сентября 2011 г.

Аннотация. Рассмотрена геолого-генетическая природа рудномагматической системы (РМС) и роль коровой контаминации в эволюции магматического расплава. Приведены критерии распознавания природы контаминированных интрузивов, отличающихся высокой степенью продуктивности на руды цветных, благородных и других металлов. Предложена теоретически и экспериментально обоснованная модель сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд и процессы фракционирования платиновых металлов в длительно формирующейся РМС еланского типа.

Ключевые слова: природа контаминированных магм, критерии распознавания, модель формирования медно-никелевых руд, фракционирование платиноидов.

Abstract. The geologic and genetic nature of ore-magmatic system (OMS) and the role of crustal contamination in the evolution of the magmatic melt are considered. The criteria for recognition of the nature of contaminated intrusions with a high degree of productivity for non-ferrous ores, noble and other metals are given. A theoretically and experimentally grounded model for sulfide platinoid-copper-nickel ores and fractionation of platinum metals in a prolonged formation of the OMS of the Yelan type is proposed.

Key words: nature of contaminated magmas, criteria for recognition, formation model for copper-nickel ores, platinoid fractionation

1. Геолого-генетическая природа рудномагматической системы еланского типа

Для объяснения необычных особенностей состава руд и вмещающих их пород Еланского и Ёлкинского сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений и разномасштабных рудопроявлений было предложено несколько возможных моделей их формирования [1–7], ни одна из которых не объясняла необычных, существенно отличных от известных месторождений этого класса, особенностей состава РМС еланского типа: 1) неравновесная ассоциация минералов – оливина (Fo_{77-86}), ортопироксена (En_{72-91}), количественно резко преобладающего в парагенезисе, наличие высокохромистой (до 60 мас. % Cr_2O_3) цинксодержащей шпинели с одной стороны и калишпата, кварца и низкокальциевого плагиоклаза (An_{17-62}) – с другой; 2) отчётливо выраженное несоответствие между высокими содержаниями SiO_2 , K, Rb, Ba, легких РЗЭ и повышенными концентрациями MgO, Cr, Ni; 4) маломедистые существенно никелистые

(Ni/Cu > 10) с повышенными содержаниями Co сульфидные руды, относительно обогащенные иридием (Pd/Ir ~ 30) и As, Mo, Sb, Bi, Pb, Zn, Au, Ag, изотопно лёгкими серой ($\delta^{34}\text{S} = -1,6 \div -11,5 \text{ ‰}$) и углеродом ($\delta^{13}\text{C} = -33 \text{ ‰}$) в рудах. Эти признаки, в сочетании с результатами количественного минералого-геохимического моделирования, позволили прийти к выводу о сложной ассимиляционной природе еланского типа РМС [8–16].

1.1. Роль коровой контаминации в эволюции магматических расплавов и критерии распознавания контаминированных интрузий

Резкое возрастание количества теоретических и экспериментальных работ [8, 12, 16, 17], посвященных роли коровой контаминации в эволюции мантийных мафит-ультрамафитовых магм и разработка комплекса критериев выделения контаминированной природы магматических образований, связано с высокой степенью продуктивности подобных магматических систем на руды цветных и благородных металлов [8, 13, 16]. Разработан [13, 16, 25–27] комплекс петрологических, геохимических, изотопно-геохимических, минералогических

и других критериев распознавания контаминированных магматических образований. Их детальный обзор приведен в ряде работ [13, 16, 18, 20–27].

Петрохимические критерии основаны на том, что первичные мантийные расплавы отличаются высокими содержаниями MgO при пониженных – SiO₂ и K₂O, в то время как в коровых образованиях наблюдаются прямо противоположные тенденции в распределении и концентрациях этих компонентов. Ассимиляция коматиитовой магмой пород континентальной коры неизбежно приведет к формированию гибридных расплавов, характеризующихся несоответствием между высокими содержаниями MgO, с одной стороны, и повышенными концентрациями SiO₂ и K₂O – с другой. Обедненность CaO как высокомагнезиальных мантийных выплавов, так и пород коры определяет, в совокупности, пониженную известковистость и, как следствие, высокие величины отношений MgO/CaO и SiO₂/CaO контаминированных магм. Кроме того, контаминированные расплавы наследуют от мантийных магм высокие значения величины MgO/FeO отношения, поскольку по сравнению с ними кислые породы содержат небольшие концентрации как MgO, так и FeO, и даже существенная добавка корового материала, как известно [20, 21], лишь незначительно повлияет на отношение MgO/FeO в гибридных образованиях.

Минералогические критерии. Ультраосновные расплавы характеризуются высокомагнезиальными составами минералов. Повышенная магнезиальность, как уже отмечалось, будет сохраняться даже при значительной степени ассимиляции кислых коровых пород, поскольку последние обеднены как MgO, так и FeO и слабо влияют на величину отношения Mg/Fe кристаллизующихся из контаминированной магмы минералов [20, 21]. Расчеты показывают [28, 29], что если из перидотитового коматиита должен кристаллизоваться оливин Fo₉₆, то даже при 50 %-ной ассимиляции верхнекорового материала гибридный расплав будет иметь на ликвидусе оливин состава Fo₉₄ (в расчетах использовались средние составы перидотитовых коматиитов Западной Австралии по Конди [23], современной верхней континентальной коры (Taylor, McLennan, [30]) и значение коэффициента распределения Mg-Fe в системе оливин-расплав, равного 0,30). Обогащенность коровых образований SiO₂ и K₂O обуславливает присутствие в гибридных породах в повышенных количествах кварца и калишпата, а также приводит к неравновесности раннего магнезиального оливина и его реакции с кремнеземистым расплавом с образованием

ортопироксена по реакции: $(Mg,Fe)_2SiO_4 + SiO_2 = (Mg,Fe)_2Si_2O_6$. Кроме того, ассимиляция богатых SiO₂ коровых образований сопровождается изменением порядка кристаллизации минералов. Многочисленными экспериментами показано [19], что ассимиляция корового материала, обогащенного SiO₂, приводит к изменению пути кристаллизации. В таких случаях первым выделяется ромбический пироксен, вследствие чего для контаминированных расплавов характерна гарцбургит-норитовая (т.е. ортопироксеновая) породная ассоциация.

Изотопно-геохимическими критериями контаминированных магм является с одной стороны их обогащенность Cr и Ni, а с другой – отчетливое наследование геохимических особенностей пород континентальной коры, которые характеризуются преобладанием крупноионных литофильных элементов (K, Rb, Ba, легкие РЗЭ) относительно элементов с высокими зарядами (Zr, Ti, Y, Nb, Ta, тяжелые РЗЭ). Контаминация обогащенных Cr и Ni высокомагнезиальных магм коровыми образованиями неизбежно приводит к формированию гибридных расплавов, имеющих высокие величины отношений Ce/Yb, Ce/Nb, Ba/Zr и пониженные – Zr/Rb, Ti/Cr, Ti/Rb. По сравнению с примитивной мантией породы верхней континентальной коры обогащены изотопами ¹⁸O, ⁸⁷Sr и обеднены ¹⁴³Nd [31]. Ассимиляция коровых образований приводит к формированию расплавов, имеющих высокие величины отношений ¹⁸O/¹⁶O ($\delta^{18}O > 6\text{‰}$) и ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ($\epsilon_{Sr} > 0$), но низкие значения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ($\epsilon_{Nd} < 0$).

Таким образом, исходные расплавы, формирование которых связано с ассимиляцией примитивными мантийными (коматиитовыми) магмами кислых пород континентальной коры, должны характеризоваться: 1) несоответствием между высокими содержаниями SiO₂, K, Rb, Ba, легких РЗЭ и повышенными концентрациями MgO, Cr, Ni, а также относительной обедненностью Nb, Ta, Ti, тяжелыми РЗЭ; 2) обогащенностью изотопами ⁸⁷Sr, ¹⁸O, и обедненностью ¹⁴³Nd; 3) высокой магнезиальностью фемических минералов, присутствием в породах кварца, калишпата, биотита и широким развитием ортопироксена.

Критерии распознавания ассимиляционного процесса были ранее опробированы на природных объектах [8, 16, 26], для которых по тем или иным признакам установлена значительная степень контаминации коровыми породами. В качестве магматических образований, в формировании исходных магм которых важную роль играла ассимиляция, выступают хорошо изученные плутоны как Бушвельд [32, 33, 34] и Садбери [33, 35], а в качестве

неконтаминированных объектов – интрузивы Скергаард [36, 37] и Киглапейт [38–41]. Петрологические характеристики этих массивов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика исходных расплавов различных интрузий (по [17, 29, 42, 43] с изменениями).

	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
SiO ₂	49,62	49,14	55,59	57,00	56,26	Zr	159	–	68	96	90
TiO ₂	2,61	0,79	0,37	1,34	0,69	Y	29	2	15	16	18
Al ₂ O ₃	13,25	18,67	12,40	16,40	12,10	Yb	2,8	0,4	0,9	1,5	1,4
FeO	13,03	10,23	9,31	7,33	8,04	Ni	141	100	274	–	310
MgO	7,23	7,78	12,24	6,40	12,87	Cr	199	120	917	200	1510
CaO	10,13	9,52	7,10	7,28	6,09	(Ce/Yb) _N	2,97	3,76	6,67	7,71	5,68
Na ₂ O	2,39	3,08	1,75	2,41	2,16	Ce/Nb	2,01	5,8	6,44	6,12	6,14
K ₂ O	0,45	0,27	0,80	1,55	1,48	Ba/Zr	0,60	–	5,79	5,13	3,70
Rb	15	1	27	46	53	Zr/Rb	10,6	8,0	2,52	2,09	1,70
Ba	96	–	394	492	333	Ti/Cr	78,7	39,5	2,22	14,4	1,56
Nb	16	1	3,6	7,3	5	Ti/Rb	1044	4740	76	62	45
La	12,8	2,5	11,6	21,3	20,3	MgO/FeO	0,55	0,75	1,30	0,87	1,60
Ce	32,1	5,8	23,2	44,7	30,7	SiO ₂ /CaO	4,90	5,16	7,83	7,83	9,24
Sr	241	350	178	422	268	δ ¹⁸ O	6,1	6,0	6,8	6,7	–
Nd	21,2	3,9	9,5	17,4	19,6	εSr	–2,6	+14,8	+41,4	+54,9	–
P	946	473	602	870	1333	εNd	+3,1	–1,4	–5,7	–8,8	–
Sm	6,6	1,0	2,1	3,4	3,1	MG	0,74	0,72	0,94	0,77	0,91

Примечание. Содержания петрогенных окислов даны в мас.%, редких элементов в г/т. Параметры εSr и εNd объясняются в тексте. MG – величина Mg/(Mg + Fe) ликвидусного оливина или пироксена. (Ce/Yb)_N – нормализованные к хондриту концентрации редкоземельных элементов. И использованные литературные данные по петрогеохимическому составу исходных расплавов приведены в тексте. Цифрами обозначены предполагаемые составы исходных расплавов: 1 – Скергаардского плутона; 2 – интрузива Киглапейт; 3 – Бушвельдского плутона; 4 – интрузива Садбери; 5 – Еланского норит-диоритового интрузива ВКМ.

Анализ таблицы показывает, что для исходных магм Бушвельда и Садбери характерны все признаки ассимиляции: обогащение легкими РЗЭ, высокие величины отношений Ce/Yb, Ce/Nb, Ba/Zr, MgO/FeO, SiO₂/CaO, δ¹⁸O, εSr и др. В породах этих интрузивов широким развитием пользуется ортопироксен довольно высокой магнезиальности (Mg/(Mg + Fe) > 0,75). Аналогичные особенности присущи и рассмотренным выше образованиям еланского комплекса ВКМ [6, 8, 16, 17, 26, 28, 29, 43–48]. Следует ещё раз подчеркнуть, что для сильно контаминированных интрузивов, к числу которых помимо указанных выше Бушвельда и Садбери предположительно относятся также Стиллуотер, Джимберлэйн, Великая Дайка, Мунни-Мунни и др. [36, 49, 50], характерна высокая степень продуктивности на платиноидно-медно-никелевые, платиновые и хромитовые руды. Установлено, что добавка богатого SiO₂ и щелочами материала к примитивному расплаву вызывает насыщение его сульфидными и хромитом, что может привести к

формированию крупных скоплений платиноносных сульфидных Cu-Ni руд и хромитов [51].

1.2. Модель ассимиляционного механизма формирования исходного рудоносного расплава еланского типа месторождений

Изложенные теоретические представления о роли коровой контаминации в образовании рудоносных ультрамафит-мафитовых расплавов и критерии их распознавания были положены в основу разработки петролого-генетической модели [7, 8, 10, 28, 29, 43–46], согласно которой формирование уникальной РМС еланского типа связано с ассимиляцией сульфидным мантийным ультраосновным (коматиитовым) расплавом при его продвижении к поверхности кислых пород континентальной коры. В результате этого процесса происходило образование гибридного расплава промежуточного (основного) состава, кристаллизация которого обусловила формирование пород еланского комплекса и ассоциирующихся с ним богатых сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд.

Подобный механизм формирования исходного для норит-диоритовых интрузий еланского никель-платиноносного комплекса расплава подтвержден количественным моделированием этого процесса [5, 10, 12, 17, 26, 29, 44], в котором в качестве первичной магмы принят средний состав перидотитовых коматиитов Западной Австралии [23], а ассимилируемого материала – средний состав верхней

континентальной коры [30] (табл. 2). Моделирование проводилось по схеме ассимиляции, сопровождавшейся фракционной кристаллизацией по алгоритму, разработанному для редких [12] и для петрогенных [49] элементов (рис. 1). В расчетах отношение массы ассимилируемого материала к фракционируемому оливину (величина R) было выбрано равным 0,8 [29].

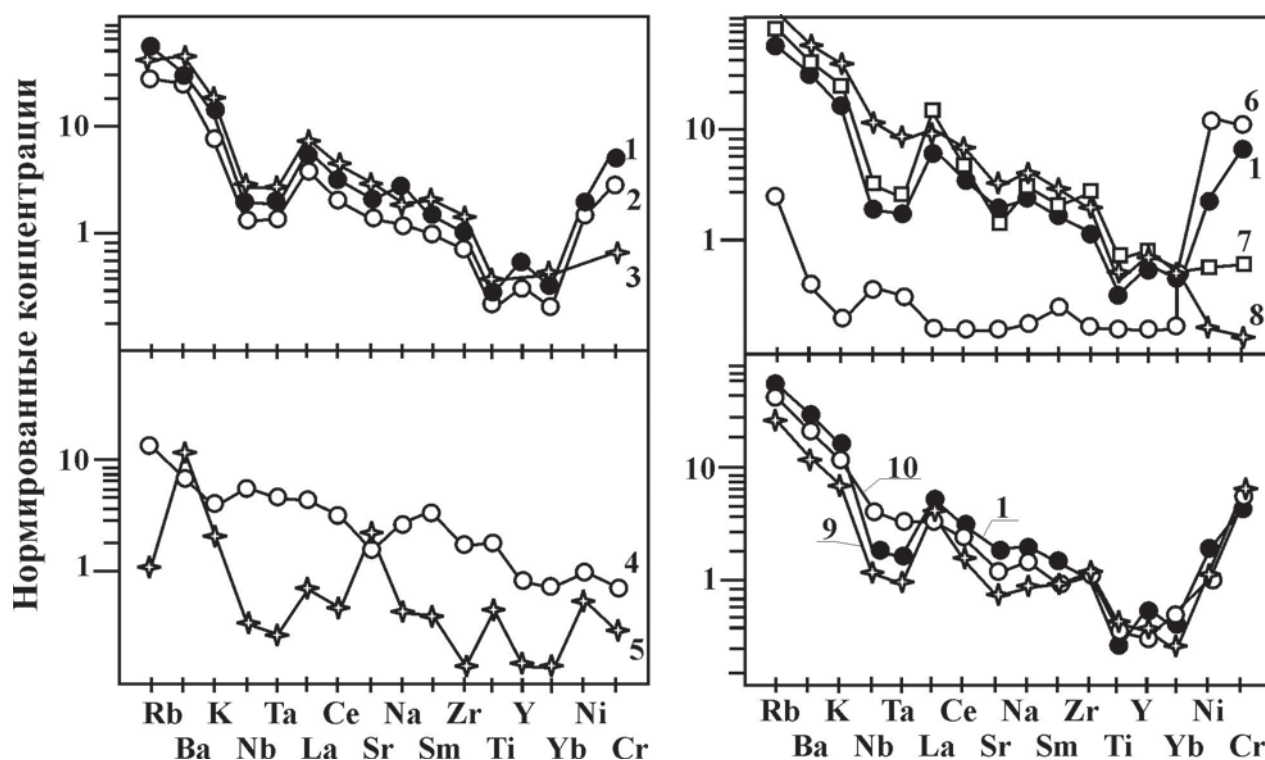


Рис. 1. Геохимическая модель распределения редкоземельных и других элементов в исходных расплавах различных по степени контаминированности интрузивах (по [17, 52]): 1–5 – профили распределения элементов в исходных расплавах различных интрузивов: Еланский (1), Бушвелд (2), Садбери (3), Скергаард (4), Киглапейт (5); 6 – перидотитовый коматиит; 7 – метаосадочные породы воронцовской серии ВКМ; 8 – верхняя континентальная кора; 9 – расплав, образующийся при 26%-ной ассимиляции коматиитовой магмой пород воронцовской серии; 10 – то же при ассимиляции пород верхней континентальной коры. Все содержания нормированы к базальтам срединноокеанических хребтов N-типа

Результаты расчетов (см. табл. 2, 3; рис. 1) свидетельствуют [16, 29], что при 26%-ной ассимиляции фракционирующим коматиитовым расплавом пород континентальной коры образуется гибридная магма, сходная по основным геохимическим параметрам (одновременная обогащенность как MgO , Cr , Ni , так и SiO_2 , K , Rb , Ba , легкими РЗЭ, высокая величина отношения Mg/Fe , низкие содержания Al_2O_3 и CaO) с исходным расплавом. Исходя из значения коэффициента распределения $Mg-Fe$ в системе оливин-расплав и ортопироксен-расплав, равного 0,30 [49, 53], было установлено [16, 26, 28, 29], что полученный в результате расчетов процесса ассимиляции гибридный расплав должен иметь

на ликвидусе ортопироксен состава En_{89} , что по существу соответствует реальному наиболее магнезиальному составу этого минерала (En_{91}) в рудовмещающих норитах еланского типа месторождений.

Ликвидусная температура такого расплава, рассчитанная с помощью известных уравнений [53–55], составляла 1290–1308 °С, а фугитивность кислорода на ранних этапах его кристаллизации, установленная по соотношению разновалентных форм железа в близколиквидусных хромшпинелидах [50], не превышала величины $f_{O_2} \sim 10^{-11}$ атм.

Такая модель легко объясняет все ранее описанные главные особенности состава интрузивных

Таблица 2

Геохимическое моделирование образования исходного расплава Еланского интрузива

	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	46,00	76,13	66,0	56,04	55,60	56,26
TiO ₂	0,25	0,68	0,5	0,53	0,46	0,69
Al ₂ O ₃	5,73	15,03	15,2	11,87	11,94	12,10
FeO	0,29	6,34	4,5	9,32	8,71	8,04
MgO	32,80	2,76	2,2	12,75	12,47	12,87
CaO	5,14	1,96	4,2	6,35	7,19	6,09
Na ₂ O	0,24	2,69	3,9	1,27	1,72	2,16
K ₂ O	0,02	3,13	3,4	1,19	1,29	1,48
Rb	3	77	112	34	48	53
Ba	5	485	550	197	223	333
Nb	1	8	25	4,3	11	5
La	0,55	37,6	30	15,5	12,5	20,3
Ce	1,65	57,9	64	24,7	27,1	30,7
Sr	22	260	350	127	163	268
Nd	1,53	23,6	26	11,0	12,0	29,6
Sm	0,56	4,44	4,5	2,4	2,4	3,1
Zr	15	200	190	96	92	90
Y	6	24	22	16	15	18
Yb	0,63	1,46	2,2	1,25	1,56	1,40
Ni	1600	90	20	180	169	310
Cr	3000	200	35	2024	1973	1510

Примечание: 1 – средний состав перидотитовых коматиитов Западной Австралии (Rb, Ba, Nb, Sr – по данным Пухтель, Симон, 1988), остальные элементы по Конди, 1983; 2 – средний состав вмещающих для интрузий еланского комплекса метаосадочных пород воронцовской серии ВКМ; 3 – средний состав современной верхней континентальной коры (Taylor, McLennan, 1985); 4 – расплав, образующийся при 26%-ной ассимиляции коматиитовой магмой пород воронцовской серии; 5 – то же при ассимиляции пород верхней континентальной коры; 6 – рассчитанный исходный расплав Еланского интрузива. Содержания петрогенных компонентов даны в мас.%, редких элементов – г/т (по [8, 16, 17, 29]).

Таблица 3

Рассчитанные составы исходных расплавов Еланского интрузива и других подобных образований

Компонент	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	56,26	51,10	57,47	53,9	55,59	51,24
TiO ₂	0,69	1,01	0,34	0,5	0,37	0,52
Al ₂ O ₃	12,10	16,49	10,26	13,5	12,40	11,29
Fe ₂ O ₃	–	2,24	2,37	–	1,24	1,86
FeO	8,04	7,49	7,20	9,4*	8,19	8,05
MnO	–	0,14	0,18	–	0,18	0,18
MgO	12,87	8,84	14,73	11,4	12,24	16,62
CaO	6,09	9,53	5,97	8,5	7,10	7,43
Na ₂ O	2,16	2,29	1,01	1,6	1,75	1,68
K ₂ O	1,48	0,71	0,36	1,2	0,80	0,82
P ₂ O ₅	0,31	0,15	0,08	–	0,14	0,18
MgO/(CaO + Al ₂ O ₃)	0,71	0,34	0,91	0,52	0,63	0,89

Примечание: 1 – рассчитанный состав исходного расплава Еланского интрузива; 2 – средний состав норита по Ле-Мэтру; 3 – бониниты Новой Гвинеи (Hickey et al., 1982); 4 – состав расплава, образующегося при контаминации перидотитовым коматиитом архейской коры (Sparks, 1986); 5 – средний состав закалочной фракции Бушвельдского плутона (Davies et al., 1985); 6 – средний состав бонинитоподобных норитов Гренландии (Hall et al., 1985). Прочерк – данные отсутствуют. *) – все железо в виде FeO.

и дайковых пород и ассоциирующих с ними сульфидных платиноидно-медно-кобальт-никелевых руд еланского типа месторождений [10, 12, 14, 16, 17, 29 и др.].

Следует отметить, что рассчитанный состав родоначального расплава (табл. 3) характеризуется рядом особенностей, которые отличают его от типичных основных магм. По некоторым параметрам (высокие содержания MgO и SiO_2 при пониженных концентрациях CaO и Al_2O_3) он приближается к образованиям бонинит-марианитовой серии островных дуг. Об этом свидетельствуют и другие характеристики норитов: высокие концентрации Cr , Ni , пониженные значения отношения Cu/Ni , низкое общее содержание редкоземельных элементов с обогащением легкими РЗЭ, высокомагнезиальный состав ликвидусных (оливина и ортопироксена) минералов. Предполагается [21, 56], что такие кремнеземистые высокомагнезиальные бонинитоподобные расплавы формировали в докембрии крупные дифференцированные комплексы (Бушвельд, Стиллутер и др.). Согласно существующим представлениям, бониниты образуются в результате частичного плавления деплетированного мантийного перидотита в условиях высокой активности H_2O , что обуславливает формирование высокомагнезиальных кварц-нормотитовых расплавов [57]. Важная роль H_2O в петрогенезисе рудовмещающих норитов еланского типа месторождений подчеркивается широким развитием в них флюидоводо-насыщенных минералов – биотита, роговой обманки. Однако, полной аналогии норитов и пород классической островодужной марианит-бонинитовой серии противоречат данные о различной магнезиальности ликвидусных хромититов в этих породах, а также повышенные содержания TiO_2 , P_2O_5 , K_2O (см. табл. 3) и ряд других детально освещённых публикаций и обобщённых на рис. 2, петрологических параметров норитов, сформировавшихся в условиях геодинамических режимов кратонной стадии развития ВКМ [7, 9, 17, 27].

К этой категории петрологических параметров формирования сульфидоносного расплава относятся [6, 10, 12, 17, 60]: 1) наличие неравновесной ассоциации минералов (широкое развитие фенокристаллов высокомагнезиального ортопироксена и оливина – ($X_{mg} = 77-91$), с одной стороны, и КПШ, кварца и относительно кислого плагиоклаза (An_{20-62}) – с другой), что существенно отличает от дифференцированных комплексов, характеризующихся последовательным сопряженным

снижением магнезиальности фемических минералов и кальциевости плагиоклаза в процессе фракционной кристаллизации расплава; 2) отчетливая зависимость между ортопироксенитовой составляющей и магнезиальностью пород при отрицательной взаимосвязи железистости ортопироксена и содержания анортитового компонента в плагиоклазе с общей магнезмальностью пород; 3) широкая распространенность оливина в сравнительно лейкократовых разновидностях норитов, что отражает образование сингенетического ряда основных интрузивно-дайковых пород преимущественно с кумуляцией и перераспределением фенокристаллов в магматической камере. Важно также отметить неупорядоченное чередование разновидностей норитов в строении магматических тел, что свидетельствует о том, что процесс формирования субвулканических интрузивно-дайкового комплекса осложнялся внедрением отдельных порций магмы в камеру, т.е. происходило в условиях открытой системы для поступления магматических расплавов.

Процесс кристаллизации контаминированного по своей природе расплава был достаточно длительным по времени и в его эволюции с определенной степенью условности выделены три стадии, для каждой из которых приведены ведущие минеральные парагенезисы пород и руд и основные термобарические параметры (табл. 4).

Некоторые петрологические параметры длительно эволюционирующей ортопироксенит-норит-диоритовой рудномагматической системы еланского типа, дополненной комплексом жильных (дайковых) пород [58], приведены на рис. 2.

Выполненные на модельном исходном высококремнеземистом магнезиальном расплаве расчеты [16, 28, 29] с использованием ряда известных уравнений [28, 53–55] показали, что наиболее высокими термобарическими параметрами характеризовалась стадия докамерной кристаллизации. Как отмечалось, температура ликвидусного оливина составила от 1282 до 1312 °С; наиболее магнезиальный ортопироксен ($X^{орп} = 91$) появляется на ликвидусе 1308 °С. Принадлежность исходной магмы еланского типа к высококремнеземистым магнезиальным расплавам определяет [17, 28, 29, 59] смену на ликвидусе оливина пироксеном при давлении около 6 кбар, что в полной мере согласуется с известными экспериментальными данными по исследованию фазовых взаимоотношений в основных (мафических) магмах при различных барических параметрах [53, 59]. Согласно расче-

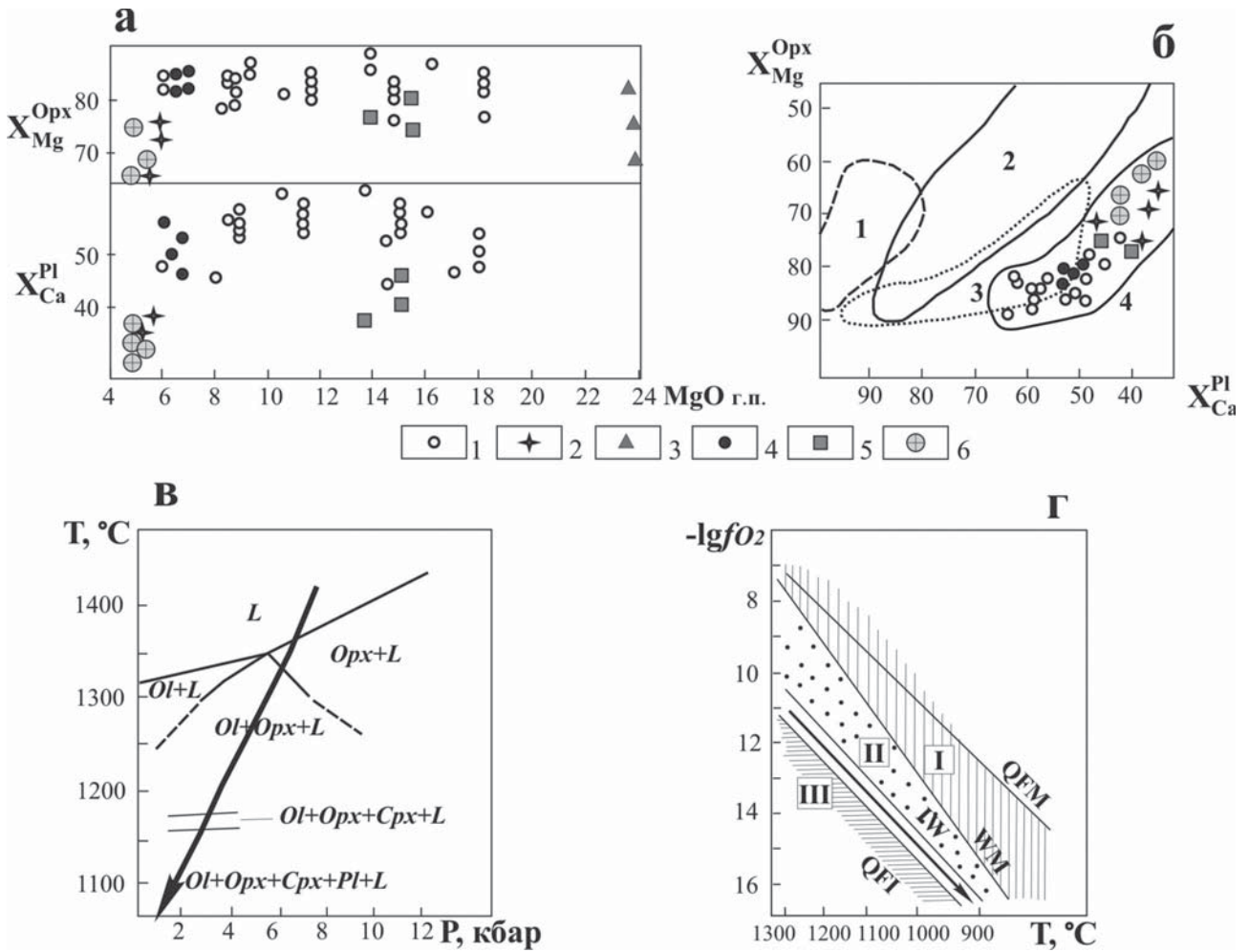


Рис. 2. Некоторые петрологические параметры формирования норит-диоритовых интрузий ВКМ (по [16, 17, 26, 28, 58] с дополнениями): 1–2 – интрузивные нориты (1) и диориты (2); 3–6 – жильные ортопироксениты (3), норит-порфириды (4), роговообманковое габбро (5), диориты (6); а – график зависимости состава ортопироксена и плагиоклаза от содержания MgO во вмещающих их породах; б – диаграмма зависимости X_{Mg}^{Opx} – X_{Ca}^{Pl} для габброидов; 1 – островных дуг, 2 – расслоенных интрузий, 3 – срединно-океанических хребтов, 4 – еланского комплекса (кратонная стадия); в – P-T-фазовая диаграмма для пород закалочной фации Бушвельдского плутона [58]; жирной стрелкой показан рассчитанный путь кристаллизации исходного расплава Еланского интрузива; г – диаграмма T- f_{O_2} для магм основного состава: I – базальты океанического дна и островных дуг, II – расслоенные интрузивные комплексы континентальных областей, III – лунные магматические породы (жирной стрелкой показан рассчитанный путь кристаллизации исходного расплава Еланского интрузива)

там, выполненным с помощью уравнения А.Уилсона по соотношению Fe^{3+}/Fe^{2+} в близкижидусных хромшпинелидах, фугитивность кислорода оценивается средним значением порядка 10^{-11} атм. [16], что свидетельствует о кристаллизации кумулюсной ассоциации минералов на докамерной стадии при низких значениях f_{O_2} в магме.

Стадия камерной кристаллизации отличалась пониженными значениями P-T – условий минералообразования. Выполненные с использованием ортопироксенового геотермометра и различных вариантов двухпироксеновой термометрии расчеты [28, 29] свидетельствуют о температурном интер-

вале кристаллизации пироксенов 898–1195 °C; начало кристаллизации плагиоклаза по ликвидусному термометру плагиоклаз–расплав [54] осуществлялось в температурном интервале 1145–1194 °C в условиях значительного снижения давления [28, 29].

Эволюция системы на позднемагматической стадии характеризовалась проявлением в локальных участках реакции ортопироксена с остаточным флюидонасыщенным расплавом с образованием преимущественно жильного роговообманкового и пегматоидного габбро с богатым сульфидным платиноидно-медно-кобальт-никелевым оруденением

Таблица 4

Модель петрогенезиса и формирования еланского типа месторождений и рудопроявлений (в рамках норитовой интрузивно-дайковой магматической системы)

Стадии	Краткая характеристика продуктов петро- и рудоге-незиса	РТ-условия формирования
1. Ранняя, докамерной кристаллизации	Выделение из исходного расплава ликвидусной OI + CrSp + Орх (\pm Pl) ассоциации в виде фенокристаллов	Температура OI – 1282–1312 °С. Принадлежность исходной магмы к высококремнеземистому магнезиальному расплаву обуславливает смену на ликвидусе оливина ортопироксеном (XОрх Mg – 90) при P около 6 кбар (Cawthon et al., 1983)
2. Внутрикамерная кристаллизация	Кристаллизация интеркумулусного парагенезиса Орх + Crх + Pl + Vt + Ort и формирование внутриинтрузивных дайковых комагматов (типа норит-порфиритов)	По Орх и различных вариантов дупироксеновой термометрии их (пироксенов) кристаллизации осуществлялась при T = 1195 °С. Начало кристаллизации Pl по ликвидусному термометру Pl-L происходило в интервале T = 1194–1145 °С в условиях значительного снижения P (Кутолин и др., 1994)
3. Завершающая стадия	Формирование (в рамках интрузивно-дайковой и позднематической стадии) даек пегматоидных габбро, роговообманкового габбро и рудных пегматитов с богатыми (Cr) + Pn + Po рудами, обогащенными поздним Ni-Co арсенид-сульфоарсенидным парагенезисом промежуточного состава (твердых растворов) и продуктов их распада в виде собственных минералов (кобальтин, герсдорфит и др.; при T < 500 °С	Согласно расчетам, основным на зависимости состава Hbl от T (Otthen, 1984), P (Hammarstrom et al, 1986) и замещения пироксенов амфиболом (Blundy et al, 1990) T = 558–609 °С, P = 1,4–1,5 кбар. Смена сульфидного (-Cr) + Pn + Po парагенезиса арсенид-сульфоарсенидным в интервале T = 600 °С и < 500 °С.

[61, 62]. Согласно расчетам [16, 28, 55], основан-ным на зависимости состава амфиболов от темпе-ратуры [63], давления [64] и f_{O_2} [66], замещение пироксенов амфиболом происходило при T = = 558–609 °С, P = 1,4–1,5 кбар и невысокой (близ-кой к f_{O_2} буферного равновесия железо-вюстит) фугитивности кислорода (см. табл. 4).

Многофазная природа еланского никель-плати-ноидного комплекса, неупорядоченное чередование и текстурно-структурная и кристалломорфологи-ческая неоднородность интрузивных дифференци-атов и их дайковых производных внутри отдельных фаз, многообразие структур, неравновесный харак-тер минеральных ассоциаций, обогащенность во-дофлюидонасыщенными минералами (апатит, биотит, амфиболы) и ряд других упоминавшихся ранее признаков свидетельствуют о длительном процессе формирования ортопироксенит-норит-диоритовой интрузивно-дайковой РМС в условиях неоднократного внедрения отдельных самостоя-тельных порций магматических расплавов, каждая их которых представляла собой автономную (в пределах фаз) петрорудогенетическую систему.

Степень избирательного концентрирования и распределения рудообразующих (Ni, Cu, Co, ЭПГ) элементов в таких автономных интрузивно-дайко-вых системах определяется не только РТ и f_{O_2} , но

и рядом других факторов: а) количеством и соста-вом несмешивающейся сульфидной жидкости в расплаве и временем ее отделения [28, 29, 51, 66–70]; б) характером фракционной кристаллизации [19, 21, 51, 67, 69, 71–74]; в) уровнем химических потенциалов S, As, Sb [4, 45, 75].

Петролого-геохимическую индивидуальность никель-платиноносных интрузивно-дайковых образований, характер слагающих их минераль-ных парагенезисов и особенности распределения в них сульфидов во многом определяются режи-мом щелочности [76]. Этот вывод подтверждается специальными расчетами по реальным составам минералов фазового равновесия норитов в коор-динатах μNa_2O – μK_2O (см. рис. 3). Судя по поло-жению на диаграмме ведущих парагенезисов, формирование норитов осуществлялось в услови-ях неоднократного изменения соотношений Na_2O и K_2O , при этом парагенезис Нур-Pl-P устойчив при низких μNa_2O и умеренных μK_2O ; в области малых значений μK_2O образуется плагиоклаз, средним значением μK_2O отвечает поле роговой обманки, а при высоких μK_2O появляется биотит, характерный минерал рудоносных норитов. О локальном повышении потенциала K_2O свидетель-ствует и присутствие в норитах интерстиционно-го ортоклаза.

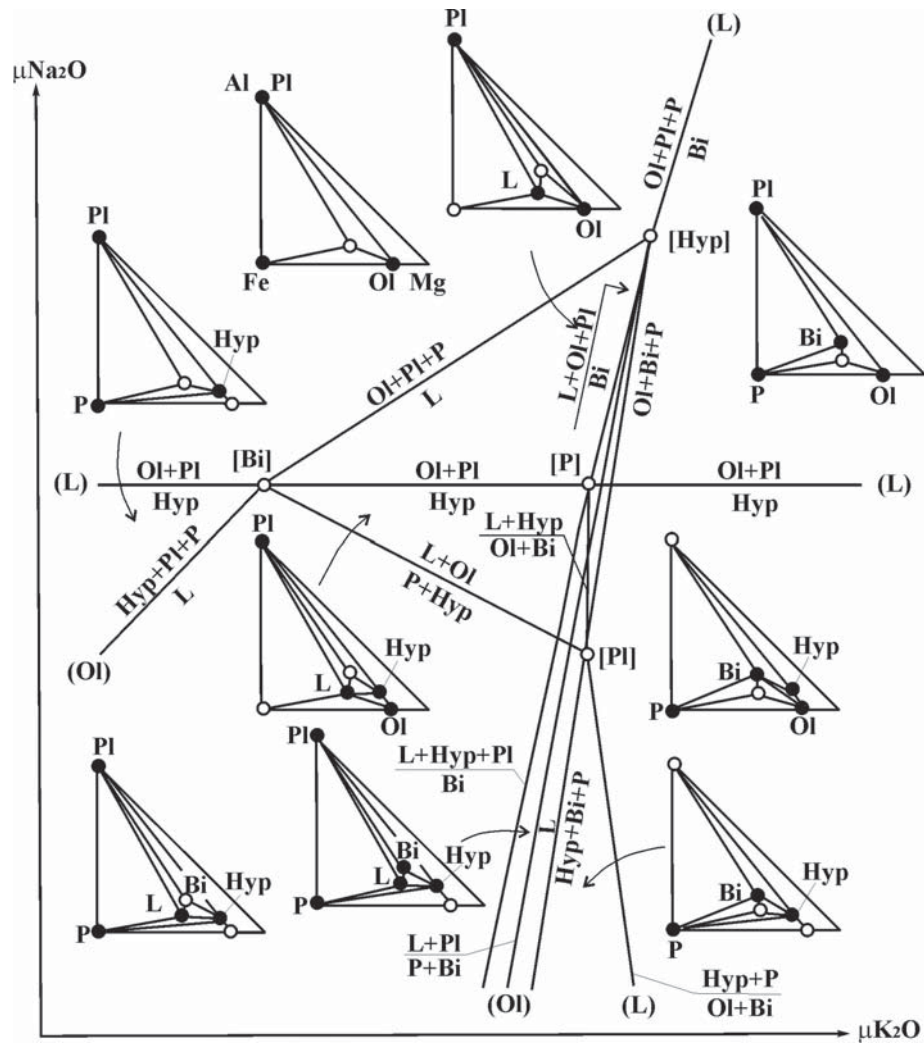


Рис. 3. Фазовые равновесия в норитах Еланского месторождения: L – расплав, Ol – оливин, Нур – ортопироксен, Bi – биотит, Pl – плагиоклаз, P – сульфиды

Режим щелочности оказал существенное влияние на формирование различных по составу минеральных парагенезисов и степени рудоносности ранней фазы еланского никель-платиноносного комплекса – даек ортопироксенитов Центрального рудопроявления, в котором сульфидные платиноидно-медно-никелевые руды еланского типа характеризуются строгой приуроченностью к мелкозернистым, обогащенным биотитом ортопироксенитам в отличие от их безрудных средне-крупнокристаллических плагиоклаз-роговообманковосодержащих разновидностей [62, 77, 78]. Как отмечалось при характеристике Центрального рудопроявления, в рудных ортопироксенитах сульфидные минералы (пирротин, халькопирит, пентландит) совместно с хромшпинелидами, молибденитом, пиритом, галенитом, сфалеритом, кубанитом, миллеритом, арсенидами и сульфурсенидами Ni, Co, самородным золотом и др. [62, 77, 78] образуют интерстицион-

ную вкрапленность, переходящую в некоторых участках в шлировые выделения; реже это мелкие каплевидные образования в пироксене и биотите. Взаимоотношения минералов свидетельствуют о вероятности выделения основной массы сульфидов одновременно с кристаллизацией мелкозернистых пироксенитов, которые по отношению к вмещающим их крупнокристаллическим образованиям рассматриваются [76] как продукты консолидации сегрегаций остаточного расплава. Мелкозернистый облик пород и насыщенность их сульфидной вкрапленностью с широким комплексом сопутствующих им арсенидов и сульфурарсенидов Ni, Co являются, по-видимому, следствием ретроградного вскипания богатого летучими и рудными компонентами расплава. Выделение при этом летучих составляющих рассматриваемой системы способствовало осаждению сульфидной фракции и кристаллизации контрастных по зернистости пород [76].

Присутствие биотита в качестве одного из наиболее распространенного после ортопироксена минерала свидетельствует о формировании рудных пироксенитов и содержащейся в них сульфидно-арсенид-сульфоарсенидной фракции при достаточно высоком потенциале μ_{K_2O} [76]. При относительно высоких потенциалах Na_2O в области малых значений μ_{K_2O} образовывались роговообманково-содержащие (\pm плагиоклаз) средне-крупнозерни-

стые ортопироксениты с крайне бедной сульфидной минерализацией.

Построенная в координатах $\mu_{Na_2O} - \mu_{K_2O}$ мультисистема (рис. 4) позволила в свое время [76] оценить условия образования обычного для рудных пироксенитов парагенезиса $Hyp + Bi + P$ по отношению к возможным в этой системе дивариантным комбинациям*.

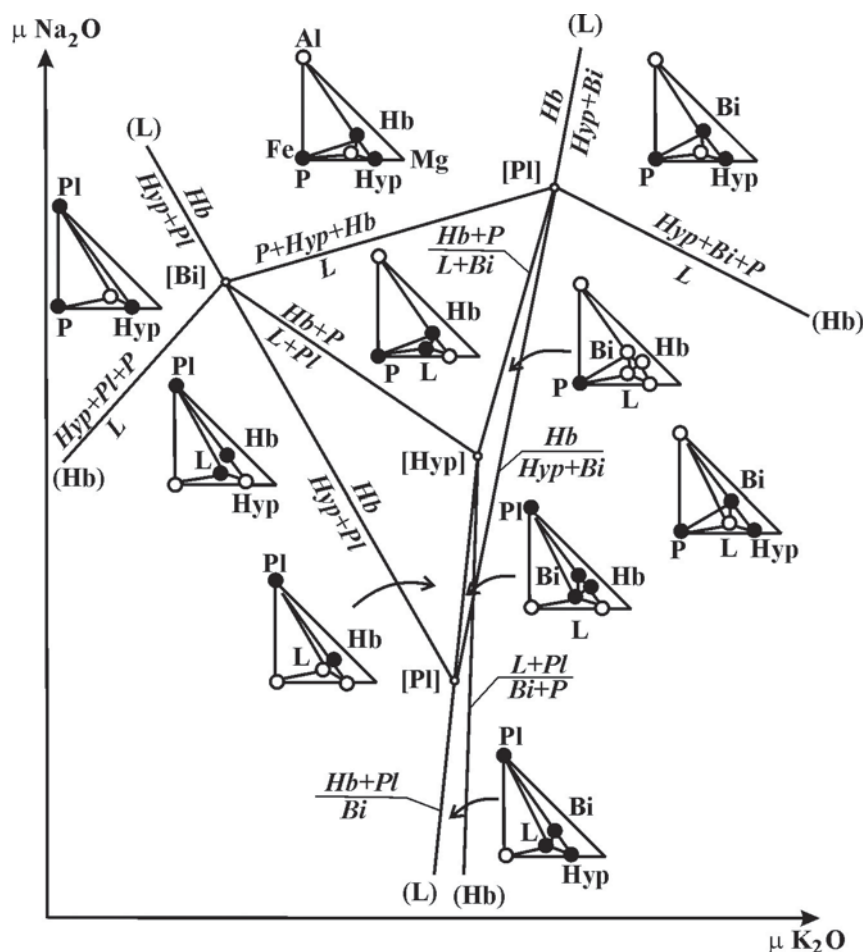


Рис. 4. Фазовые равновесия в ортопироксенитах Центрального рудопоявления (по [17, 76]): принятые обозначения: Hyp – ортопироксен; Hb – роговая обманка; Bi – биотит; Pl – плагиоклаз; L – расплав; P – сульфиды

Бессульфидный и беспироксеновый пучки на диаграмме располагаются в поле расплава, т.е. раскристаллизация последнего неизбежно привела к выделению ромбического пироксена и рудной фазы, к которым в зависимости от соотношения μ_{Na_2O} и μ_{K_2O} могут присоединиться плагиоклаз, роговая обманка и биотит. Как следует из анализа диаграммы все три парагенезиса ($Hyp + P + Pl$, $Hyp + P + Hb$ и $Hyp + P + Bi$) устойчивы при относительно высоких потенциалах Na_2O , но при различной активности K_2O : в области малых значений μ_{K_2O} образуется плагиоклаз, средним

значениям μ_{K_2O} отвечает поле роговой обманки, а при высоких μ_{K_2O} появляется биотит. Таким образом, наличие биотита в качестве наиболее распространенного после ромбического пироксена минерала свидетельствует о кристаллизации этих пород и содержащихся в них сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд при достаточно высоких потенциалах Na_2O и K_2O .

* Исходные данные для расчета моновариантных линий и их константы приведены в [17, 76].

Тесная пространственно-временная связь богатых по содержанию рудообразующих элементов роговообманковых габбро внутриинтрузивной, обогащённой щелочами и флюидами, жильной фации с рудовмещающими норитами Еланского месторождения, с которыми образуют отчетливые секущие и лишь иногда постепенные переходы, а так же значительные черты сходства сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд по concentra-

ции и величинам отношений Ni, Cu, Co, ЭПГ (рис. 5, а, б), минеральным парагенезисам и другим рудно-геохимическим признакам [62], являются основной для рассмотрения петро- и рудогенезиса рудоносной жильной породной ассоциации в общем контексте с известной моделью формирования сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд еланского типа и механизма фракционирования платиновых металлов [4, 10, 12, 16, 17, 28, 29, 79, 80].

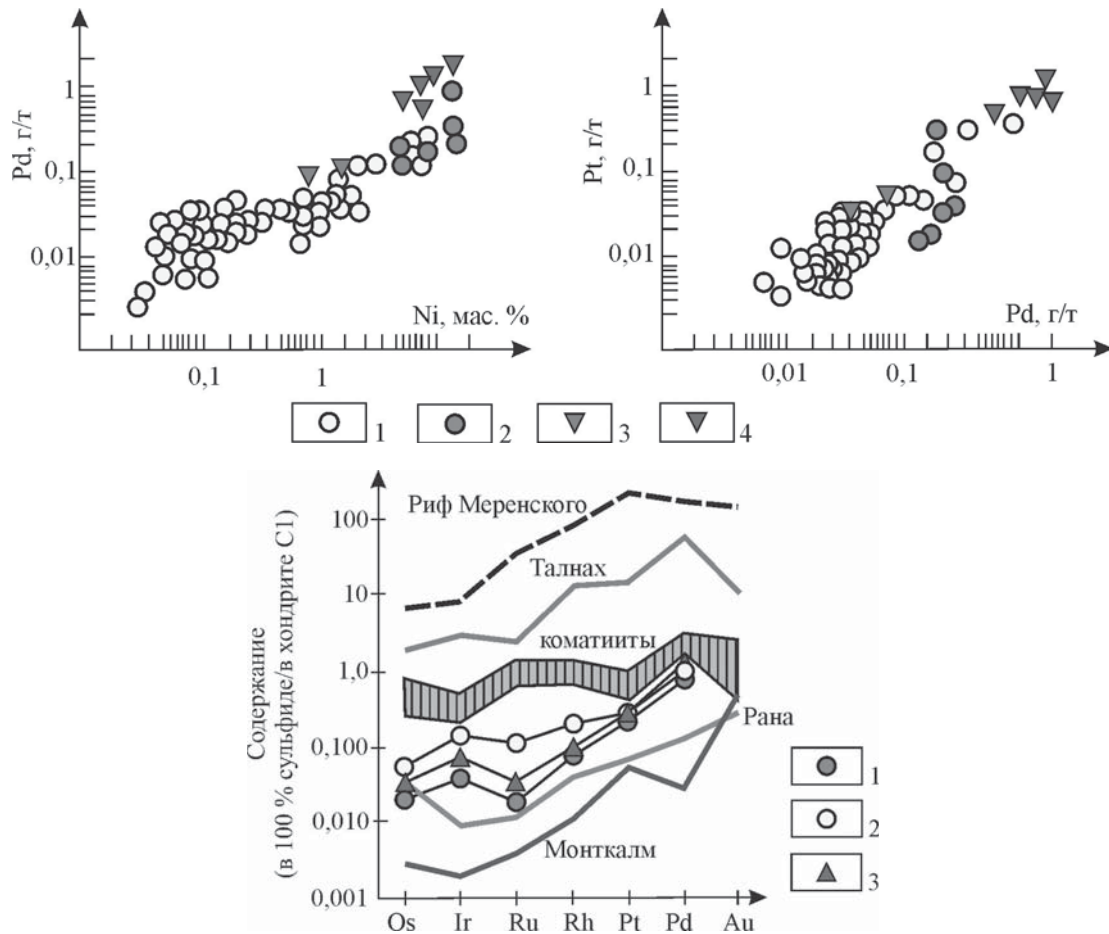


Рис. 5. Особенности распределения Pt, Pd и Ni (а, б) и сравнительная характеристика распределения ЭПГ (в) в рудах различных типов месторождений (по [14, 16, 17, 29, 42] с дополнениями авторов): а–б – бинарные диаграммы зависимости Pt-Ni, Pt-Pd в рудах Еланского месторождения: 1 – вкрапленные руды в норитах; 2 – массивные руды в норитах; 3 – вкрапленные и гнездово-шлировые руды в жильных ортопироксенитах; 4 – вкрапленные, гнездово-прожилково-вкрапленные и массивные руды жильных роговообманковых габбро и их пегматоидных разновидностей; в – хондрит-нормализованные содержания ЭПГ в рудах различных месторождений (в пересчете на 100 % сульфидов; по [51, 67]): 1–2 – средний состав вкрапленных (1) и массивных (2) руд Еланского месторождения; 3 – состав богатых гнездово-прожилково-вкрапленных и гнездово-шлировых руд в жильных роговообманковых габбро и их пегматоидных разновидностях

Таким образом, длительная эволюция гибридного по своей природе магматического расплава происходила при давлениях 6–1,5 кбар в интервале температур 1300–500°, устойчиво низкой фугитивности кислорода и в условиях ритмичного измене-

ния соотношений $\mu\text{Na}_2\text{O}$ – $\mu\text{K}_2\text{O}$ с некоторым преобладанием в рудоносной интрузивно-дайкиковой породной ассоциации потенциала Na_2O над K_2O , что во многом определило специфику еланского типа сульфидной платиноидно-медно-никелевой РМС.

2. Модель формирования сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд и фракционирования платиновых металлов

Характерной особенностью высоконикелестых маломедистых кобальтсодержащих руд еланского типа является низкая (по сравнению с комайтиит-ассоциированными месторождениями [51]) суммарная концентрация платиноидов [4, 12, 14, 17, 45, 81], сопоставимая с месторождениями Монткалм и Рана [67], в которых имело место раннее отделение сульфидов (см. рис. 5, в). Более крутой (по сравнению с комайтиитами) наклон профиля ЭПГ в рудах, ассоциирующихся как с норитами интрузивной фации, так и с жильными роговообманковыми габбро, отражает контаминированную природу исходного расплава [10, 16, 28, 29], а наличие рутениевого минимума является, вероятно, результатом удаления из расплава еще на ранних стадиях его эволюции хромита, с которым предположительно ассоциируют лаурит – RuS_2 [16, 17, 29, 82].

Поскольку платиновые металлы концентрируются в сульфидной жидкости гораздо сильнее, чем

Ni и Cu (т.е. $D_{ЭПГ} \gg D_{Ni,Cu}$), то раннее выделение даже небольших объемов сульфидов приводит к резкому обеднению последующих порций сульфидного вещества платиноидами относительно Ni и Cu и, как следствие, к увеличению в рудах отношений Ni/ЭПГ и Cu/ЭПГ [67, 69]. Выполненными, по известным методикам [67, 68], расчетами количество сульфидного вещества, отделившегося до внедрения расплава в камеру современного залегания, было установлено, что столь значительное (трех-, пятикратное) обеднение платиновыми металлами руд еланского типа относительно типичных комайтиит-ассоциированных месторождений может быть достигнуто при раннем отделении из расплава 0,16 % сульфидного вещества [16, 28, 29].

О положении сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд в общей модели петрогенезиса и формирования еланского типа месторождений позволяет судить ряд известных [16, 17, 29] бинарных диаграмм (рис. 6), которые иллюстрируют зависимость между ЭПГ, Ni и Cu во всей совокупности интрузивных и жильных пород и ассоции-

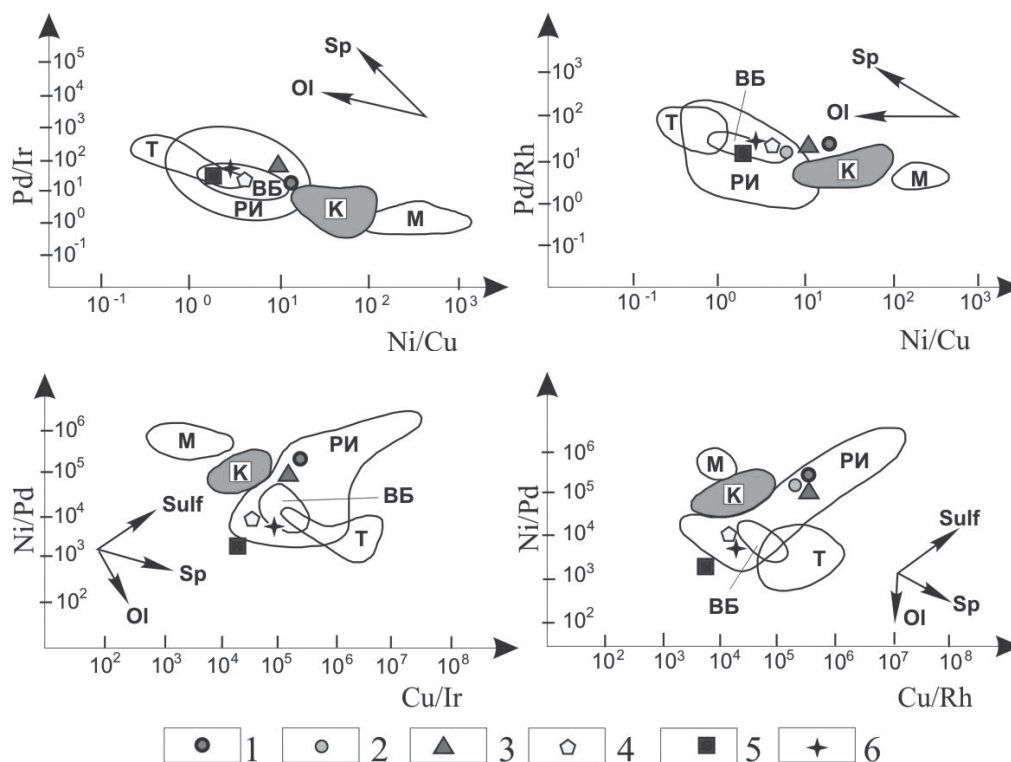


Рис. 6. Диаграмма зависимостей (по [17, 29] с авторскими дополнениями): а – Pd/Ir-Ni/Cu; б – Pd/Rh-Ni/Cu; в – Ni/Pd-Cu/Ir; г – Ni/Pd-Cu/Rh применительно пород и руд еланского типа месторождений: 1 – массивные руды Еланского месторождения; 2 – вкрапленные руды Еланского месторождения; 3 – гнездово- и прожилково-вкрапленные руды в жильных роговообманковых габбро; 4 – нориты и роговообманковые габбро; 5 – диориты; 6 – норит-порфириты; М – мантия, К – комайтииты, ВБ – высокомагнезиальные базальты, РИ – расслоенные интрузии, Т – толеиты, векторы – показано изменение состава остаточного расплава при выделении из него оливина (Ol), шпинели (Sp) и сульфидов (Sulf)

рующих с ними руд. В соответствии с известными представлениями [51, 70, 83] фракционная кристаллизация коматитового расплава сопровождается отделением ликвидусных оливина и шпинели, концентрирующих преимущественно Ni, Ir и Rh по сравнению с Cu и Pd, что приводит к увеличению в остаточном расплаве отношений Pd/Ir и Pd/Rh [70]. С другой стороны, как отмечалось, раннее отделение сульфидного вещества обуславливает обеднение последующих порций сульфидной жидкости платиноидами относительно Ni и Cu, увеличивая тем самым отношения Ni/ЭПГ в рудах [67, 70]. Расположение фигуративных точек состава пород интрузивной и дайковой фаций и ассоциирующихся с ними руд на рис. 6 удовлетворительно согласуется с подобной интерпретацией.

Специфические распределения Ni, Cu и ЭПГ в рудах еланского типа месторождений и рудопроявлений позволили наметить генерализованную схему фракционирования сульфидного расплава [16, 17, 28, 29], несмешивающаяся жидкость которого представляет собой [51, 66] взвешенные в силикатном расплаве капли обогащенного никелем моносульфидного твердого раствора (MSS) и бедного медью промежуточного твердого раствора (ISS). Так как MSS по удельному весу превышает ISS, то происходит гравитационная отсадка капель высоконикелистого моносульфидного твердого раствора. В условиях понижающейся температуры из такого раствора вслед за пирротинном происходит кристаллизация пентландита с образованием преимущественно массивных пентландит-пирротиновых руд, а из бедного медью промежуточного твердого раствора (ISS) формировалась ограниченно развитая халькопиритовая (\pm кубанит) масса, в большей мере присущая вкрапленным халькопирит-пентландитовым рудам.

Преимущественно входящие в ISS Cu, Pt и Pd [66] обуславливают относительно повышенные концентрации этих элементов во вкрапленных рудах и более низкие величины отношений Ni/Pd и Ni/Pt в сульфидной фракции (по сравнению с массивными пентландит-пирротиновыми рудами). Близкие величины отношений Pd/Pt в массивных и вкрапленных рудах в норитах и жильных комагматах не противоречат предлагаемому механизму фракционирования рудного вещества, поскольку такая дифференциация сульфидной жидкости предполагает избирательное накопление Pd и Pt в ISS относительно MSS, но не разделение этих элементов друг от друга [51].

С позиций рассматриваемой модели петрогенеза очевидны и высокие содержания в ассоциирующихся с норитами массивных рудах пентландита, поскольку он кристаллизуется из обогащенного никелем MSS, определившего в целом высоконикелистый и маломедистый еланский тип оруденения. Эта особенность руд Еланского и Елkinsкого месторождений была ранее установлена [4] при анализе парагенетической диаграммы в системе координат $\mu\text{O}-\mu\text{S}$ (рис. 7). Соотношение Fe, Ni, S в пентландит-пирротиновых рудах таково, что состав расплава (MSS) целиком располагается в фазовом треугольнике Po-Pn-Mt(Crsp) и полное исчерпание сульфидной жидкости при их формировании (I ветвь кристаллизации), практически не сопровождается выделением халькопирита [4].

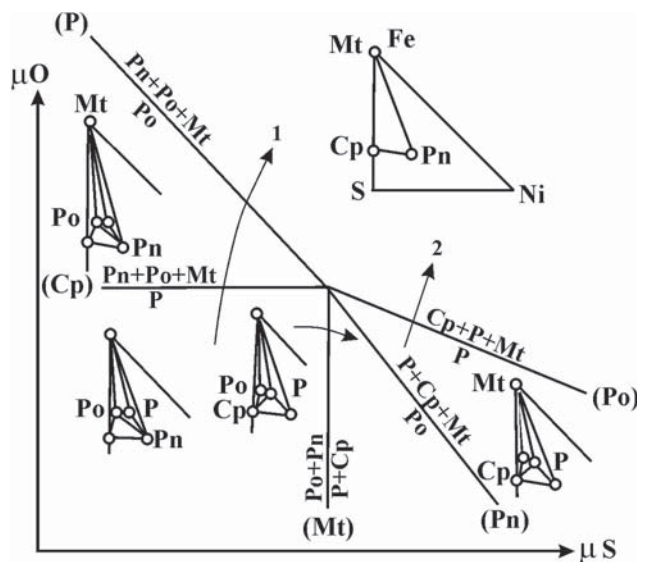


Рис. 7. Парагенетическая диаграмма медно-никелевых руд Еланского месторождения в системе координат $\mu\text{O}-\mu\text{S}$. P – сульфидный расплав; Po – пирротин; Pn – пентландит; Cr – халькопирит; Mt – магнетит; (по [4])

Вместе с тем эта схема существенно нарушается в рудах, ассоциирующихся с жильными роговообманковыми габбро, их пегматоидными разновидностями, а так же норит-порфиритами, в рудном минеральном парагенезисе которых заметно возрастает роль халькопирита относительно пентландита, а отношение Ni/Cu (от 2 до 12,5) обычно на один-два порядка ниже, чем в рудах интрузивной фракции (Ni/Cu от 10 до 114 и более). Их положению на парагенетической диаграмме в большей мере отвечает II ветвь кристаллизации с выделением халькопирита (см. рис.7). Подобный характер распределения Ni и Cu (при несколько возрастающей

роли Pd относительно Pt) определяется составом расплава, который в жильных породах (роговообманковые габбро, их пегматоидные разновидности, норит-порфириды), судя по их пространственно-временной сопряженности с определенными дифференциатами интрузивных фаций норитов, неоднозначному характеру взаимоотношений с вмещающими породами (от резких и неясно выраженных контактов до постепенных переходов [62, 84]), а также составу минеральных рудообразующих парагенезисов и петрогеохимическим признакам, представлял собой обогащенный флюидами конечный (автономный) продукт отдельных дифференциатов кристаллизующейся норитовой интрузивно-дайковой рудно-магматической системы [62].

Исследования сульфидного платиноидно-медно-никелевого оруденения, ассоциирующего с жильными породами, позволили подтвердить и другую важную особенность руд еланского типа месторождений – постоянное присутствие в рудо-

носных дайках арсенидно-сульфоарсенидной минеральной ассоциации с широкими вариациями химического состава и повышенными концентрациями ЭПГ [61, 62, 77, 78 и др.]. Однотипность минерального арсенид-сульфоарсенидного парагенезиса (никелин, кобальтин, герсдорфит, кобальтистый герсдорфит и никелистый кобальтин, кобальтин-герсдорфит, смальтин-скуттерудит, раммельсбергит, ульманит, данаит и др.) и соотношения слагающего его минералов с основными сульфидными (пирротин, пентландит, халькопирит) руд в дайковых образованиях с сульфидными платиноидно-медно-никелевыми рудами в интрузивных норитах позволяют использовать известные парагенетические диаграммы, разработанные [4] применительно Еланского месторождения (рис. 8; 9). Эти диаграммы наиболее полно отражают основные параметры рудообразующей системы, последовательность и температуру кристаллизации минералов, поведение подвижных компонентов и т. п.

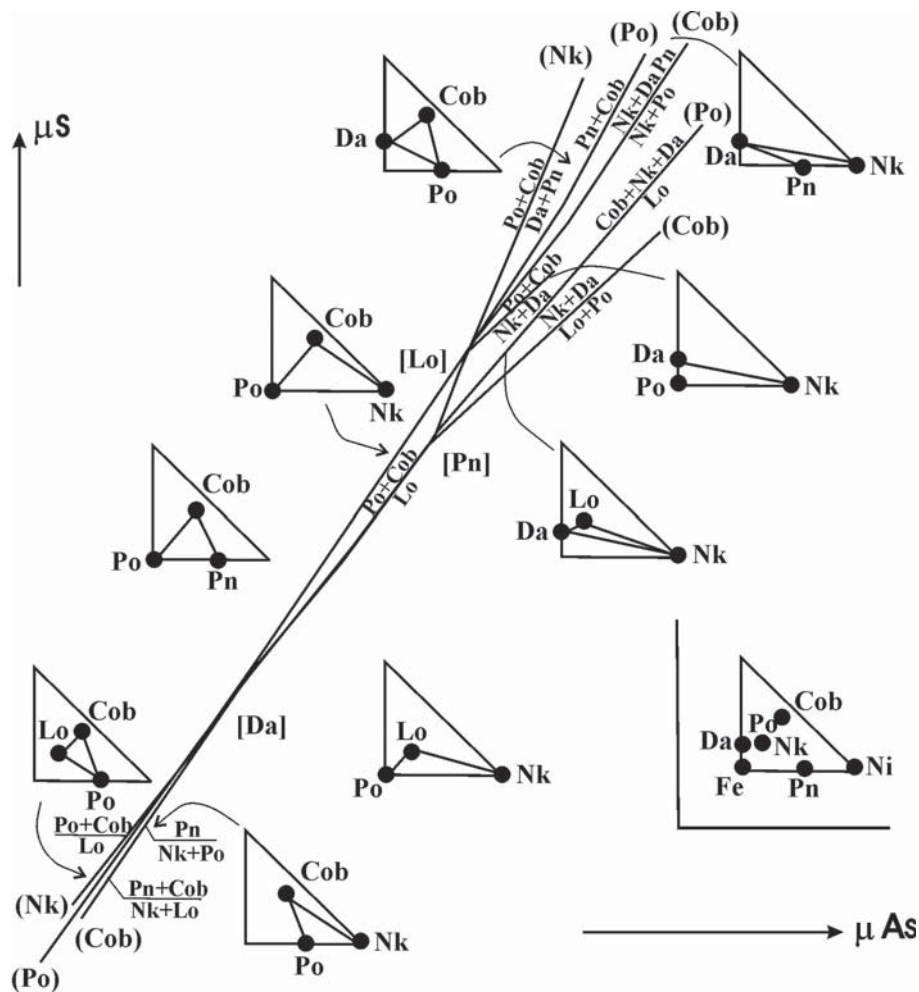


Рис. 8. Парагенетическая диаграмма арсенидной и сульфоарсенидной ассоциации руд Еланского месторождения в зависимости от химического потенциала S и As: Po – пирротин, Pn – пентландит, Cob – кобальт-герсдорфит, Nk – никелин, Da – данаит, Lo – леллингит; по [4]

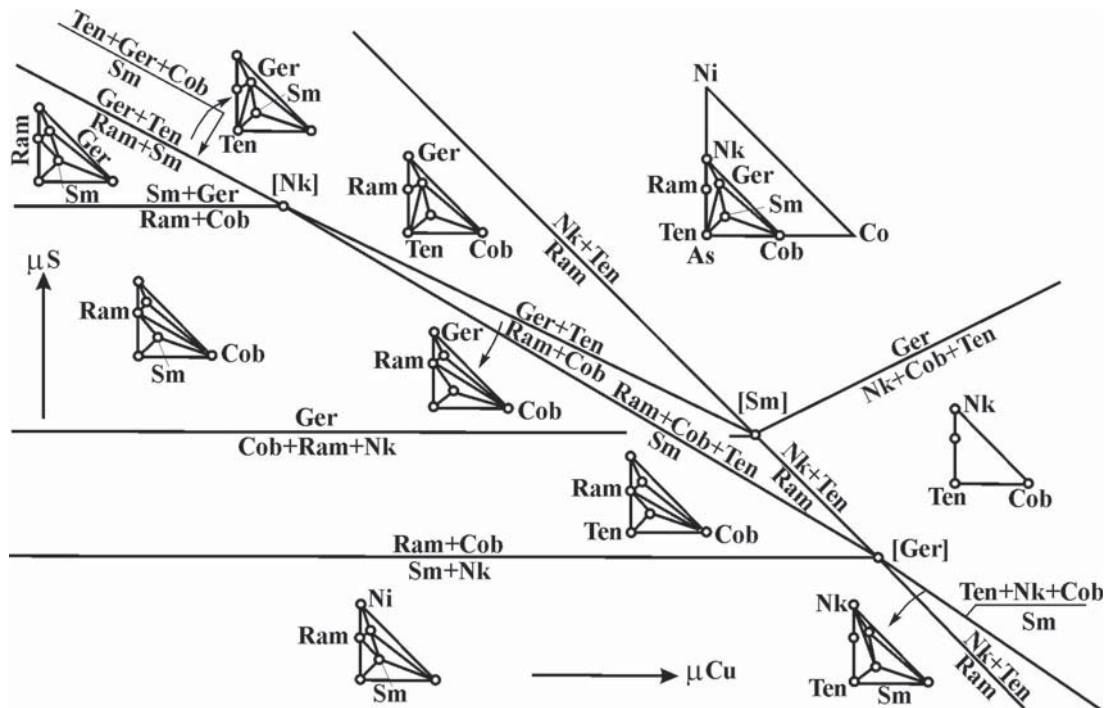


Рис. 9. Парагенетическая диаграмма медь-никель-кобальтовой арсенид-сульфоарсенидной минеральной ассоциации руд Еланского месторождения в системе координат $\mu S - \mu Cu$. Nk – никелин, Cob – кобальтин, Ger – герсдорфит, Ram – раммельсбергит, Sm – смальтин, Ten – теннантит; по [4]

Анализ известной [4] моновариантной мульти-системы в координатах $\mu S - \mu As$, на которой в качестве фаз выступают характерные для руд, ассоциирующих как с интрузивными норитами, так и их жильными комагматами, минералы (Po, Pn, Cob, Nk, Da, Lo; см. рис. 8), однозначно свидетельствует, что с повышением концентрации мышьяка устойчивый в ее левой части парагенезис Po – Pn – Cob сменяется сначала ассоциациями с Cob и Nk, затем ассоциациями Nk с Lo и Da. При этом переход из одного фазового поля в другое происходит при очень небольших изменениях μAs , что, вероятно, явилось одной из главных причин возникновения кобальтин-герсдорфитов переменного состава, их гетерогенности и зональности. Крайне ограниченная распространенность в минеральных парагенезисах леллингита, стабильного при относительно низких концентрациях As и S, и данаита, устойчивого при высоких значениях этих параметров, дают основание считать [4, 17, 45, 81], что главная масса арсенид-сульфоарсенидной минерализации формировалась преимущественно в условиях умеренных и варьирующих значений потенциалов мышьяка и серы.

Относительная обогащенность руд, ассоциирующих как с норитами, так и жильными (дайковыми) образованиями, никель-кобальтовыми сульфоарсенидами промежуточного состава (никелис-

тый кобальтин, кобальтистый герсдорфит, кобальтистый никелин, кобальтин-герсдорфит, кобальт-никелевый леллингит и др. [12, 17, 45, 61, 62, 78, 81, 85]) отражают вероятность их образования в относительно высокотемпературных условиях и подтверждается экспериментальными данными о смесимости Ni, As, S и Co, As, S при $T > 600^\circ C$ в любых соотношениях с образованием твердых растворов различного состава. При более низких ($< 500^\circ C$) температурах твердые изоморфные смеси не образуются и возникают собственно герсдорфит и кобальтин, характерные преимущественно для высокотемпературных пневматолито-гидротермальных условий минералообразования.

В оценке температурного режима формирования в рудах еланского интрузивно-дайкового комплекса арсенид-сульфоарсенидного парагенезиса использована так же известная [4, 17] парагенетическая диаграмма Ni – Co – As при различных уровнях $\mu S - \mu Cu$ (см. рис. 9). Для получения более объективных данных в состав никель-кобальтового парагенезиса включен установленный в рудах еланского типа месторождений теннантит, стабильность и степень распространенности которого в среднетемпературных кобальт-никелевых месторождениях определяется режимом μCu [75].

Полный вариант мультисистем рассмотрен в [4, 17]. Здесь же важно подчеркнуть, что по мере

снижения температуры минералообразования и все более полного перехода серы во вполне подвижные состояния происходит закономерная смена четырех (безтеннантитовых) парагенезисов: $Sm + Nk + Ram \rightarrow Ram + Cob + Nk (Sm) \rightarrow Ram + Cob + Ger (Sm) \rightarrow Ram + Ger + Sm \rightarrow \mu S$. Поскольку замена стабильных в широком диапазоне изменения активности серы смальтина и раммельсбергита теннантитсодержащим среднетемпературным парагенезисом возможна лишь при крайне высоких потенциалах серы, в качестве определяющих индикаторов режима серы в процессе завершающей стадии рудообразования выступают никелин, кобальтин и герсдорфит, являющиеся ведущими платиносодержащими минералами еланского типа руд и характеризующие вместе с тем, более высокотемпературные условия их образования [17].

В целом же в процессе кристаллизации сульфидоносного расплава и образования рудных тел в вулканно-интрузивно-дайкивой петрорудогенетической системе происходила последовательная смена пентландит-пирротинового (с ограниченной ролью халькопирита) парагенезиса платиносодержащим кобальт-никелевым арсенид-сульфоарсенидным в условиях понижающейся температуры и все более полного перехода серы во вполне подвижное состояние [4, 17].

Особо следует подчеркнуть, что присутствующие совместно с арсенидами и сульфоарсенидами молибденит, золото, теллурувисмутит и другие типичные для высокотемпературных постмагматических процессов минералы представляют собой, по существу, конечные продукты того же сульфидного расплава, прошедшего совместно с интрузивно-дайкивой породной ассоциацией длительную эволюцию.

Таким образом, анализ характера взаимоотношений интрузивно-дайкивых пород и оруденения свидетельствует о длительном, полихронном процессе формирования сульфидной платиноидно-медно-никелевой рудномагматической системы еланского типа.

Важно особо подчеркнуть, что столь сложное взаимоотношение даек и оруденения еланского типа месторождений [58] определяется многофазной природой никель-платиноносного комплекса, в котором наряду с главной массой руд в норитах значительными концентрациями цветных металлов (Ni, Co, Cu) сопровождаются: а) предшествующие формированию сульфидных медно-никелевых руд в норитах рудоносные ортопироксениты, которые слагают ряд дайкообразных тел с аналогичным еланскому типу руд минеральным парагенезисом

и близкими величинами соотношений Ni, Co, Cu и ЭПГ; б) внутриинтрузивные жильные роговообманковые габбро с богатыми сульфидными платиноидно-медно-никелевыми рудами, ассоциирующими с рудоносными меланократовыми норитами интрузивной фации. Комагматичные становлению малопродуктивных в отношении оруденения лейкократовых порфировидных норитов внутриинтрузивные жильные норит-порфиры характеризуются бедной сульфидной вкрапленностью, сходной по минеральному составу и величинам соотношений рудообразующих элементов с вкрапленными рудами еланского типа. Завершающие становление еланского никель-платиноносного комплекса диориты являются послерудными, редкая сульфидная минерализация в которых в известной мере наследует рудно-геохимические признаки, присущие длительно формирующейся РМС еланского типа [17, 58].

Общность структурно-вещественных, минералого-петрографических рудно-и изотопно-геохимических признаков интрузивно-дайкивых пород и связанных с ними разномасштабных сульфидных платиноидно-медно-никелевых подтверждает неоднократное внедрение в промежуточные камеры самостоятельных порций магматических расплавов, каждый из которых представлял собой автономную (в пределах фаз) петрорудогенетическую систему. Пространственно-временная сопряженность с интрузивными комагматами рудоносных даек, состав породо- и рудообразующих минеральных парагенезисов, характер распределения Ni, Cu, Co, ЭПГ и их соотношений в жильных породах и ассоциирующих с ними рудах определяются составом расплавов, который представлял собой обогащенный флюидами конечный автономный продукт отдельных дифференциатов еланской интрузивно-дайкивой рудообразующей системы. В процессе кристаллизации сульфидоносного расплава и образования руд в длительно формирующейся петрорудогенетической системе происходила последовательная смена пентландит-пирротинового и халькопирит-пентландит-пирротинового парагенезиса обогащенным платиноидами кобальт-никелевым арсенид-сульфоарсенидным в условиях понижающейся температуры, умеренных и варьирующих значений потенциалов мышьяка и серы.

Высокая подвижность полиэлементной флюидно-сульфидной системы не исключает возможности появления рудных залежей с повышенным содержанием арсенидов и сульфоарсенидов никеля и кобальта и сопутствующих им платиноидов вблизи сульфидоносных норит-диоритовых тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочаров В. Л. О первично-коматиитовом источнике никелевых сульфидных руд в норит-диоритовых интрузиях ВКМ / В. Л. Бочаров [и др.] // Геохимия. – 1987. – № 3. – С. 430–437.
2. Золотухин В. В. Об одном перспективном типе никеленосных интрузивов / В. В. Золотухин, Н. М. Чернышов, С. П. Молотков // Докл. АН СССР. – 1984. – Т. 276, № 2. – С. 442–445.
3. Конников Э. Г. Особенности распределения элементов-примесей в сульфидах и норитах Еланского интрузива Воронежского кристаллического массива и генезис бонинитоподобных магм / Э. Г. Конников // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 9. – С. 1258–1267.
4. Чернышов Н. М. Новый тип сульфидного никелевого оруденения Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов // Геология рудных месторождений. – 1985. – № 3. – С. 34–45.
5. Чернышов Н. М. Генетические типы месторождений медно-никелевой формации Воронежского кристаллического массива (ВКМ) / Н. М. Чернышов // Рудообразование и генетические модели эндогенных рудных формаций. – Новосибирск : Наука, 1988. – С. 182–190.
6. Чернышов Н. М. Нижнепротерозойская никеленосная формация рифтогенного типа в пределах ВКМ / Н. М. Чернышов, А. В. Переславцев, С. П. Молотков // Магматизм рифтов. – М. : Наука, 1989. – С. 60–69.
7. Чернышов Н. М. Структурно-вещественная эволюция сульфидно-никелевых рудномагматических систем докембрия / Н. М. Чернышов // Геология и геофизика. – 1991. – № 6. – С. 11–19.
8. Переславцев А. В. Петрология норит-диоритовых интрузий докембрия Воронежского кристаллического массива в связи с проблемой их никеленосности : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / А. В. Переславцев. – Воронеж, 1993. – 23 с.
9. Чернышов Н. М. Металлогеническое районирование Воронежского кристаллического массива в связи с его никеленосностью / Н. М. Чернышов // Геология рудных месторождений. – 1990. – № 3. – С. 3–16.
10. Чернышов Н. М. Новый тип никеленосной формации в докембрии Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов [и др.] // Изв. АН СССР. Серия: Геология. – 1991. – № 9. – С. 111–124.
11. Чернышов Н. М. Промышленно-генетические типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений новой никеленосной провинции России и проблема их освоения / Н. М. Чернышов // Вест. Воронеж. гос. ун-та. Естеств. науки. – 1993. – Вып. 1. – С. 188–215.
12. Чернышов Н. М. Еланский тип сульфидных медно-никелевых месторождений и геолого-генетическая модель их формирования (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Геология рудных месторождений. – 1995. – Т. 37, № 3. – С. 220–236.
13. Чернышов Н. М. Проявления нелинейных петрогеногенетических процессов при формировании некоторых типов платинометалльных рудообразующих систем и их аналитические выражения / Н. М. Чернышов // Проблемы магматической и метаморфической петрологии : тез. докл. – М., 1997. – С. 59–60.
14. Чернышов Н. М. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения еланского типа (геология, закономерности размещения, минералого-геохимические особенности руд, геолого-генетическая модель формирования) / Н. М. Чернышов // Вест. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 1998. – № 5. – С. 120–151.
15. Чернышов Н. М. Геолого-генетическая модель формирования сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений еланского типа (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI веке (минералогия, генезис, технология, аналитика) : сб. науч. тр. – М., 1999. – Т. 4. – С. 120–140.
16. Chernyshov N. M. The role assimilation in forming the nickeli-ferrous norite-diorite intrusions of the Voronezh crystalline massif / N. M. Chernyshov, A. V. Pereslavtsev // Int. Geol. Rev. – 1994. – V. 36. – P. 587–604.
17. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. – 448 с.
18. De Paolo D. J. Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization / D. J. De Paolo // Earth. Planet. Sci. Letters. – 1981. – V. 53, № 2. – P. 189–202.
19. Campbell I. H. The difference between oceanic and continental tholeiites: a fluid dynamic explanation / I. H. Campbell // Contrib. Miner. Petrol. – 1985. – V. 91, № 1. – P. 37–43.
20. Huppert H. E. Cooling and contamination of mafic and ultramafic magmas during ascent through continental crust / H. E. Huppert, R. S. J. Sparks // Earth Planet. Sci. Letters. – 1985. – V. 74, № 4. – P. 371–386.
21. Sparks R. S. J. The role of crystal contamination through geological time / R. S. J. Sparks // Earth Planet. Sci. Letters. – 1986. – V. 78, № 2/3. – P. 211–223.
22. Compston W. Zircon xenocrysts from the Kambalda volcanics: age constraints and direct evidence for older continental crust below the Kambalda-Norseman greenstones / W. Compston [et al.] // Earth Planet. Sci. Letters. – 1986. – V. 76, № 3/4. – P. 229–311.
23. Конди К. Архейские зеленокаменные пояса / К. Конди. – М. : Мир, 1983. – 390 с.
24. Arndt N. T. Crystally contaminated komatiites and basalts from Kambalda, Western Australia / N. T. Arndt, G. A. Jenner // Chem. Geol. – 1986. – V. 56. – № 3/4. – P. 229–255.
25. Arndt N. T. Crystally contaminated komatiites and basalts from Kambalda, Western Australia / N. T. Arndt, G. A. Jenner // Chem. Geol. – 1986. – V. 56, № 3/4. – P. 229–255.

26. Чернышов Н. М. Роль ассимиляции при формировании платиноносных ультрамафит-мафитовых рудномагматических систем крапной стадии / Н. М. Чернышов, А. В. Переславцев // Магматизм и геодинамика : материалы 1-го Всерос. петрограф. совещ. – Уфа, 1995. – Кн. 4: Петрология и рудообразование. – С. 150–152.
27. Чернышов Н. М. Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии / Н. М. Чернышов [и др.] // Геотектоника. – 1997. – № 3. – С. 21–30.
28. Переславцев А. В. Породообразующие минералы и петрогенезис никеленосных норит-диоритовых интрузий Воронежского кристаллического массива / А. В. Переславцев, А. А. Слюняев // Изв. РАН. Серия: Геология. – 1992. – № 11. – С. 81–98.
29. Переславцев А. В. Закономерности фракционирования малых элементов в никеленосных норит-диоритовых интрузиях Воронежского кристаллического массива / А. В. Переславцев, А. А. Слюняев // Геология рудных месторождений. – 1991. – № 4. – С. 32–46.
30. Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: its composition and evolution / S. R. Taylor, S. M. McLennan. – Oxford e.a. : Blackwell Sci. Publ., 1985. – 312 p.
31. Фор Г. Основы изотопной геологии / Г. Фор. – М., 1989. – 590 с.
32. Davies G. The platinum group elements and gold contents of the marginal rocks and sills of the Bushveld Complex / G. Davies, M. Tredoux // Econ. Geol. – 1985. – V. 80. – № 6. – P. 838–848.
33. Faggard B. E. Origin of the Sudbury Complex by meteoritic impact: neodymium isotopic evidence / B. E. Faggard, A. R. Basu, M. Tatsumoto // Science. – 1985. – V. 230, № 4724. – P. 436–439.
34. Sharpe M. R. Ultramafic sills beneath Eastern Bushveld Complex: mobilized suspensions of early lower zone cumulates in a parental magma with boninitic affinities / M. R. Sharpe, L. J. Hulbert // Econ. Geol. – 1985. – V. 80, № 6. – P. 849–871.
35. Naldrett A. J. Contamination at Sudbury and its role in ore formation / A. J. Naldrett, B. V. Rao, N. M. Evensen // Metallogeny of basic and ultrabasic rocks. London, 1986. – P. 75–91.
36. Уэйджер Л. Расслоенные изверженные породы / Л. Уэйджер, Г. Браун. – М. : Мир, 1970. – 552 с.
37. Hoover J. D. The chilled marginal gabbro and contact rocks of the Skaergaard intrusion / J. D. Hoover // J. Petrol. – 1989. – V. 30, № 2. – P. 441–476.
38. De Paolo D. J. Isotopic studies of processes in magma chambers: 1. The Kiglapait intrusion, Labrador / D. J. De Paolo // J. Petrol. – 1985. – V. 26, № 4. – P. 925–951.
39. Kalamarides R. I. Kiglapait geochemistry: 6. Oxygen isotopes / R. I. Kalamarides // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1984. – V. 48, № 9. – P. 1827–1836.
40. Morse S. A. Kiglapait geochemistry. VII. Yttrium and the rare earth elements / S. A. Morse, K. M. Nolan // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1985. – V. 49, № 10. – P. 1621–1644.
41. Nolan K. M. Marginal rocks resembling the estimated bulk composition of the Kiglapait intrusion / K. M. Nolan, S. A. Morse // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1986. – V. 50, № 12. – P. 2381–2386.
42. Слюняев А. А. Элементы группы платины в никеленосных норит-диоритовых интрузиях докембрия Воронежского кристаллического массива / А. А. Слюняев [и др.] // Геология рудных месторождений. – 1991. – № 6. – С. 57–73.
43. Чернышов Н. М. Формационно-генетическая типизация платинометалльного оруденения докембрия Центральной России для целей прогноза / Н. М. Чернышов // Платина России. – М. : Геоинформмарк, 1995. – Т. II, кн. 1. – С. 126–130.
44. Чернышов Н. М. Типы никеленосных интрузий и медно-никелевого оруденения Воронежского массива / Н. М. Чернышов // Сов. геология. – 1986. – № 12. – С. 42–54.
45. Чернышов Н. М. Минералогические особенности сульфидных никелевых руд Еланского месторождения / Н. М. Чернышов [и др.] // Минералогический журнал. – 1991. – № 1. – С. 18–30.
46. Чернышов Н. М. Формационно-генетическая типизация платинометалльных месторождений и проявлений для целей прогноза / Н. М. Чернышов, Д. А. Додин // Докл. РАН. – 1994. – Т. 334, № 4. – С. 493–495.
47. Чернышов Н. М. Уран-свинцовый возраст норит-диоритовых интрузий Еланского никеленосного комплекса Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов [и др.] // Доклады РАН. – 1998. – Т. 359, № 1. – С. 98–101.
48. Cowden A. Platinum-group elements and gold in the comatiite hosted Fe-Ni-Cu sulfide deposits at Kambalda, Western Australia / A. Cowden [et al.] // Econ. geol. – 1986. – V. 81, № 5. – P. 1126–1235.
49. Longhi S. The petrology of high-Mg dykes from Beartooth Mountains, Montana: a search for parental magma of the Stillwater Complex / S. Longhi, J. L. Wooden, K. D. Coppingier // J. Geophys. Res. – 1983. – V. 88, Suppl. – P. 53–69.
50. Wilson A. H. The geology of the Great Dyke, Zimbabwe: the ultramafic rocks / A. H. Wilson // J. Petrol. – 1982. – V. 23, № 2. – P. 240–292.
51. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд / А. Дж. Налдретт. – СПб. : СПбГУ, 2003. – 487 с.
52. Чернышов Н. М. Нелинейные петролого-геохимические параметры платиноносных РМС и их аналитическое выражение / Н. М. Чернышов // Тез. докл. Междунар. симпозиума по прикладной геохимии стран СНГ. – М., 1997. – С. 265–266.
53. Roeder P. L. Olivine-liquid equilibrium / P. L. Roeder, R. F. Emslie // Contrib. Mineral. Petrol. – 1970. – V. 29, № 4. – P. 275–289.
54. Кутюлин В. А. Петрологическая интерпретация петрохимических данных для вулканических пород /

- В. А. Кутолин, А. А. Прусевич // Геология и геофизика. – 1986. – № 7. – С. 99–104.
55. Перчук Л. Л. Температурный режим кристаллизации и дифференциации основных и ультраосновных магм / Л. Л. Перчук, В. И. Ваганов // Очерки физико-химической петрологии. – М. : Наука, 1978. – С. 142–173.
56. Hall P. R. Noritic dykes of southern West Greenland: early Proterozoic boninitic magmatism / P. R. Hall, D. J. Hughes // Contrib. Miner. Petrol. – 1987. – V. 97, № 2. – P. 169–182.
57. Hickey R. L. Geochemical characteristics of boninite series volcanics: implications for their source / R. L. Hickey, F. A. Frey // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1982. – V. 46, № 11. – P. 2099–2125.
58. Чернышова М. Н. Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Воронежского кристаллического массива (Центральная Россия) / М. Н. Чернышова. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. – 368 с.
59. Cawthorn R. G. Experimental data at 3 kbars pressure on parental magma to the Bushveld Complex / R. G. Cawthorn, G. Davies // Contrib. Mineral. Petrol. – 1983. – V. 83, № 1/2. – P. 128–135.
60. Чернышов Н. М. Сульфидно-никелевые рудно-магматические системы (типизация и эволюция) / Н. М. Чернышов // Изв. АН СССР. Серия: Геология. – 1992. – № 11. – С. 94–106.
61. Буковшин В. В. Богатые эпигенетические медно-никелевые руды пегматоидного типа Еланского месторождения / В. В. Буковшин, С. П. Молотков, М. Н. Чернышова // Проблемы геодинамики и минерализации Восточно-Европейской платформы : материалы междунар. конф. – Воронеж : ВГУ, 2003. – Т. 2. – С. 261–263.
62. Чернышова М. Н. Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Еланского типа и их соотношение с оруденением (Воронежский кристаллический массив) / М. Н. Чернышова. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2002. – 184 с.
63. Otthen M. T. The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites / M. T. Otthen // Contrib. Mineral. Petrol. – 1984. – V. 86, № 2. – P. 189–199.
64. Hammarstrom J. M. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer / J. M. Hammarstrom, E. an. Zen // Amer. Mineralogist. – 1986. – V. 71, № 11/12. – P. 1297–1313.
65. Blundy J. D. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole – plagioclase geothermometer / J. D. Blundy, T. J. B. Holland // Contrib. Mineral. Petrol. – 1990. – V. 104, № 2. – P. 208–224.
66. Дистлер В. В. Платиновые металлы в медно-никелевых рудах Печенгского рудного поля / В. В. Дистлер, А. А. Филимонова, Т. Л. Гроховская // Геология рудных месторождений. – 1989. – № 6. – С. 3–17.
67. Barnes S. J. Unusual nickel and copper to noble-metal ratios from the Rana Layered Intrusion, northern Norway / S. J. Barnes // Norsk Geol. Tidsskr. – 1987. – V. 67, № 3. – P. 215–231.
68. Barnes S. J. Fractionation of the PGE and gold in some komatiites of the Abitibi greenstone belt / S. J. Barnes, A. J. Naldrett // Econ. Geol. – 1987. – V. 82. – P. 165–183.
69. Barnes S. J. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum group elements gold, nickel and copper: examples from Norway / S. J. Barnes [et al.] // Proc. Symp. Geo-platinum. – London : Elsevier, 1988. – P. 113–143.
70. Barnes S. J. The use of metal ratios in prospecting for platinum group element deposits in mafic and ultramafic intrusions / S. J. Barnes // J. Geochem. Explor. – 1990. – V. 37, № 1. – P. 91–99.
71. Barnes S. J. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas / S. J. Barnes, A. J. Naldrett, M. P. Gorton // Chem. Geol. – 1985. – V. 53, № 3/4. – P. 303–323.
72. Drake M. J. Plagioclase – melt equilibria / M. J. Drake // Geochim. et cosmochim. acta. – 1976. – V. 40, № 4. – P. 457–465.
73. Grove T. L. Fractionation of pyroxene – phyric MORB at low pressure: an experimental study / T. L. Grove, W. B. Bryan // Contrib. Mineral. Petrol. – 1983. – V. 84, № 4. – P. 293–309.
74. Naldrett A. J. The behaviour of platinum group elements during fractional crystallization and partial melting with special reference to the composition of magmatic sulfide ores / A. J. Naldrett, S. J. Barnes // Fortschr. Miner. – 1986. – V. 64, № 2. – P. 113–133.
75. Годлевский М. Н. Поведение арсенидов и сульфидов никеля и кобальта при постмагматических процессах / М. Н. Годлевский // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. – Л. : Наука, 1967. – С. 211–220.
76. Чернышов Н. М. Породообразующие минералы никеленосных интрузий ВКМ / Н. М. Чернышов, Г. Г. Дмитренко. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1979. – 248 с.
77. Чернышова М. Н. Особенности состава сульфидного медно-никелевого оруденения Центрального рудопоявления в связи с проблемой формационно-генетической принадлежности рудовмещающих пироксенидов / М. Н. Чернышова // Вестн. Воронеж. ун-та. Серия: Геология. – 1999. – № 7. – С. 120–127.
78. Чернышова М. Н. Особенности состава породных ассоциаций даек еланского никель-платиноносного комплекса ВКМ / М. Н. Чернышова // 2-е Всерос. петрограф. совещ. «Петрография на рубеже XXI века: итоги и перспективы», Сыктывкар : УРНИЦ РАН, 2000. – С. 242–243.
79. Додин Д. А. Платинометалльные месторождения России / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, Б. А. Яцкевич. – СПб. : Наука, 2000. – 755 с.
80. Додин Д. А. Металлогения платиноидов крупных регионов России / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, О. И. Чередникова. – М. : Геоинформмарк, 2001. – 302 с.

81. Буковшин В. В. Арсениды и сульфоарсениды медно-никелевых руд Воронежского кристаллического массива / В. В. Буковшин, Н. М. Чернышов // Зап. ВМО. – 1985. – № 3. – С. 335–340.

82. Плаксенко А. Н. Типоморфизм акцессорных хромшпинелидов ультрамафит-мафитовых магматических формаций / А. Н. Плаксенко. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1989. – 224 с.

83. Налдретт А. Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд / А. Дж. Налдретт. – СПб. : СПбГУ, 2003. – 487 с.

84. Чернышова М. Н. О генетической природе жильных норит-порфиритов еланского никеленосного комплекса / М. Н. Чернышова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 1997. – № 3. – С. 65–76.

85. Чернышов Н. М. Новые данные о составе рудных минералов Еланского сульфидного медно-никелевого месторождения и особенностях распределения в них благородных металлов / Н. М. Чернышов, В. В. Буковшин, И. П. Лапутина // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2000. – № 5 (10). – С. 136–148.

*Воронежский государственный университет
Н. М. Чернышов, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой минералогии и петрологии ВГУ, руководитель НОЦ «Геология рудных месторождений Центральной России» ВГУ-ИГЕМ РАН
Тел. 8 (473) 220-86-81
petrology@list.ru*

*М. Н. Чернышова, профессор кафедры минералогии и петрологии, доктор геолого-минералогических наук
Тел. 8 (473) 220-84-34
petrology@list.ru*

*Voronezh State University
N. M. Chernyshov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored Researcher of RF, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Department of Mineralogy and Petrology at Voronezh State University (VSU), Head of Centre for Research and Education «Geology of ore deposits of Central Russia» at VSU-IGEM RAS.
Tel. 8 (473) 220-86-81
petrology@list.ru*

*M. N. Chernyshova, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences
Tel. 8 (473) 220-84-34
petrology@list.ru*