



УДК: 552.2:553.4(470.32)

МЕСТО И РОЛЬ ДАЕК В ОБЩЕЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СУЛЬФИДНЫХ ПЛАТИНОИДНО-МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЕЛАНСКОГО ТИПА ВКМ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ РОССИЯ)

М.Н. Чернышова

Воронежский государственный университет

На основе сравнительного анализа минералогических, химических и рудно-геохимических признаков обосновывается принадлежность даек, сопровождающихся разномасштабным сульфидным платиноидно-медно-никелевым оруденением, к еланскому типу рудообразующей системы (РМС). Взаимоотношение даек и оруденения еланского типа месторождений, длительный, полихронный процесс формирования этого типа РМС определяется многофазной природой никель-платиноносного комплекса. Общность структурно-вещественных, рудно-геохимических параметров руд в интрузивно-дайковой породной ассоциации подтверждает известную модель контаминированной природы исходного сульфидоносного магматического расплава. Приводятся основные физико-химические параметры РМС и положение ассоциирующих с дайками сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд в общей модели петрогенеза и формирования еланского типа месторождений.

Табл. 8; рис. 11; библиограф. 61 наименований.

Проблеме соотношения даек и оруденения посвящен ряд фундаментальных монографических работ [1, 2, 3, 4, 5, 6] и статей [7, 8, 9, 10, 11]. Однако в большинстве из них рассматривается пространственно-временная и генетическая связь жильных пород с гидротермальным рудообразованием. Сведения о месте и роли даек при формировании магматических по своей природе сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудообразующих систем крайне ограничены и касаются в основном их пространственно-временной сопряженности с оруденением [2, 6, 7, 12, 13, 14].

На основе анализа комплекса признаков (соотношения даек с различными интрузивными фазами и слагающими их рудоносными дифференциатами, структурных факторов сонахождения даек и оруденения, сопоставления рудно-геохимических параметров руд в интрузивах и их жильных рудоносных комагматов еланского типа сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений) выявлен сложный характер пространственно-временных и генетических взаимоотношений руд и даек, принадлежность последних как к внутрирудным, сопровождающимся разномасштабным оруденением, так и послерудным образованиям. Эти данные свидетельствуют о том, что дайки являются не только важнейшим структурно-вещественным и рудонесущим компонентом, но и выступают в качестве одного из ведущих критериев, подтверждающих многофазный ха-

рактер становления никель-платиноносных комплексов и длительный, многостадийный процесс формирования сульфидной платиноидно-медно-никелевой рудномагматической системы (РМС) еланского типа.

В оценке взаимоотношений даек и оруденения многофазного ортопироксенит-норит-диоритового еланского никель-платиноносного комплекса особое значение приобретает прежде всего выявление в дайковых образованиях специфических рудно-геохимических признаков, присущих еланскому типу сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений. К числу таких признаков, выступающих, вместе с тем, и в качестве наиболее значимых критериев оценки генетической взаимосвязи даек и оруденения и их пространственно-временных соотношений, относятся минеральный и химический состав руд, характер распределения в них главных и сопутствующих элементов.

1. Рудно-геохимические особенности еланского типа месторождений

Различные по мощности (2-100 м) и протяженности (200-1000 м) рудоносные зоны еланского типа месторождений, сопровождающиеся различными по составу жильными образованиями (ортопироксениты, норит-порфириды, роговообманковое габбро, диори-

ты, диоритовые порфириты, гранодиориты) наследуют крутопадающий характер и элементы внутреннего строения интрузивно-дайки колонны (рис. 1, 2) и сложены [15, 16, 17, 18] преимущественно вкрапленными ($Ni = 1,32$ мас. %, $Co = 0,04$ мас. %, $Cu = 0,14$ мас. %; $Ni/Cu > 9$, $Ni/Co > 33$)*, прожилково- и гнездово-вкрапленными ($Ni = 5,48$ мас. %, $Co = 0,25$ мас. %, $Cu = 0,19$ мас. %; $Ni/Cu > 28$, $Ni/Co > 24$) рудами с маломощными (0,2-2,5 м, иногда до 3-5 м) жилами массивных ($Ni = 8,01$ мас. %, $Co = 0,19$ мас. %, $Cu = 0,1$ мас. %; $Ni/Cu > 110$, $Ni/Co > 42$) и брекчиевидных (0,2-1,0 м) руд.

Руды еланского типа имеют специфический минеральный состав. Для них характерно [15, 17, 18, 20]: а) высокие содержания (до 30-55 от. %) пентландита с существенными вариациями концентраций Ni (28,3-43,9 мас. %), крайне ограниченное (2,5 %, иногда до 10-15 %) распространение никельсодержащего ($Ni =$

1,5-6,8 мас. %) халькопирита при ведущей роли пирротина (гексагональная и моноклинная его разновидности, троилит), нередко никельсодержащего ($Ni = 0,17-2,49$ мас. %), постоянное присутствие (2-5 %) высокохромистых ($Cr_2O_3 = 34,1-50,6$ мас. %) цинксодержащих ($ZnO = 2,9-4,9$ мас. %) хромшпинелидов, аргентопентландита ($Ni = 18,1-23,0$ мас. %, $Ag = 11,7-15,1$ мас. %), кубанита, титаномагнетита; б) совмещение раннего халькопирит-пентландит-пирротинового и позднего кобальт-никелевого арсенид-сульфоарсенидного (до 2-5 %) парагенезиса, представленного кобальтином, кобальтином-герсдорфитом, данаитом, гаухекорнитом, ульманитом, ассоциирующими с теллурвисмутитом, молибденитом, галенитом, сфалеритом, борнитом, макинавитом, самородным золотом и др. [15, 17, 18]. По содержанию Ni , Co , Cu руды еланского типа принадлежат к маломедистым высоконикелистым с повышенными концентрациями Co , значительно обогащены

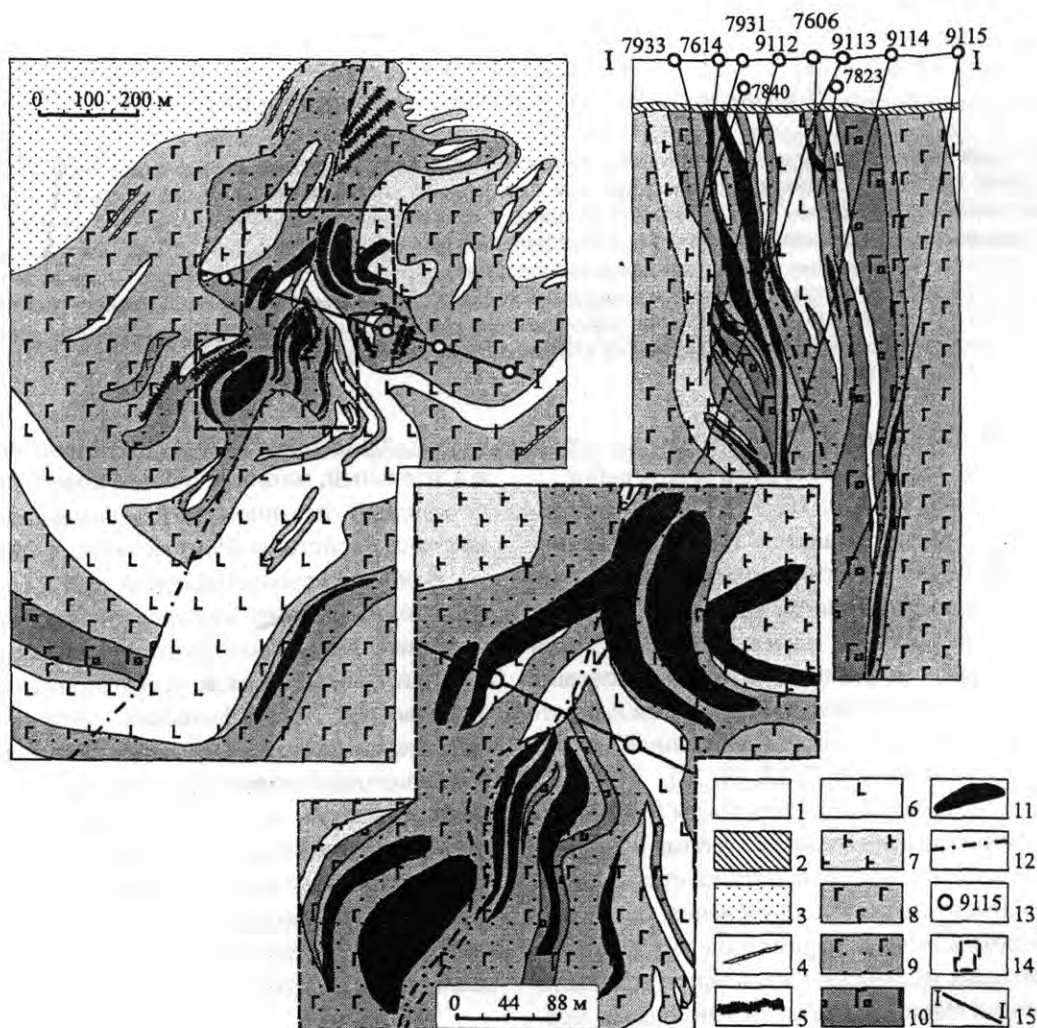


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Еланского месторождения (по [18, 19]):

1 – породы платформенного чехла (на разрезе); 2 – кора выветривания на кристаллическом фундаменте (на разрезе); 3 – песчаниково-сланцевые отложения воронцовской серии; 4 – дайки порфиритов, лампрофиров; 5 – диориты второй интрузивной фазы еланского комплекса; 6 – норит-порфириты жильные; 7 – нориты тонкозернистые («фельзические»); 8-9 – нориты мелко-среднезернистые (8) и порфиroidные нориты (9); 10 – габбро-нориты оливинные и безоливинные мамонского комплекса; 11 – рудные тела; 12 – тектонические нарушения; 13 – скважины и их номера; 14 – контур врезки; 15 – линия геологического разреза

*Средние значения для руд Еланского месторождения (по: [17, 18, 19]).

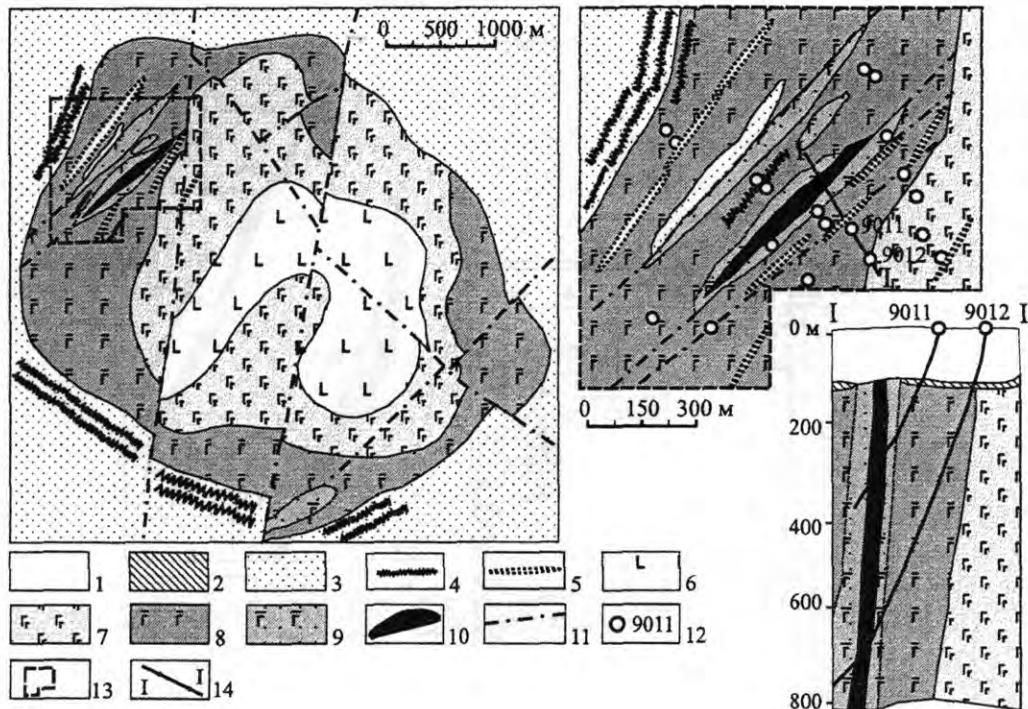


Рис. 2. Геологическая карта Елкинского месторождения (по: [18, 19]):

1 – породы платформенного чехла (на разрезе); 2 – кора выветривания на кристаллическом фундаменте (на разрезе); 3 – песчаниково-сланцевые отложения воронцовской серии; 4 – дайки норит-порфиров; 5 – дайки диоритов и диоритовых порфиров; 6 – диориты; 7 – нориты мелкозернистые мелано-мезократовые; 8 – нориты среднезернистые лейкократовые и полевошпатизированные; 9 – нориты амфиболитизированные с сульфидной вкрапленностью; 10 – рудные тела; 11 – тектонические нарушения; 12 – скважины; 13 – контур врезки; 14 – линия геологического разреза

изотопно легкой серой ($\delta^{34}\text{S} = -0,3 \div -11,6 \%$; [18, 21]) и отличаются широким комплексом попутных полезных (Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Os, Ir, Ru, Se, Te, Mo) и вредных (As, Sb, Bi, Pb, Zn, Cr) компонентов.

2. Особенности состава сульфидного платиноидно-медно-никелевого оруденения, связанного с дайками еланского никель-платиноносного комплекса

Исследования химического и минерального состава рудной минерализации в жильных ортопироксенитах, роговообманковом габбро и их пегматоидных разновидностях, норит-порфиритах, диоритах многофазного никель-платиноносного комплекса позволяют наиболее полно оценить место и роль даек в общей геолого-генетической модели формирования РМС еланского типа [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29].

В этой длительно развивающейся РМС жильные **ортопироксениты** являлись наиболее ранней, предшествующей норит (2065±15 млн. лет) – диоритовой (2050±14 млн. лет; [30, 31]) породной ассоциации, фазой. В пределах ранее консолидированного сложнодифференцированного Елань-Коленовского плутона (2090 ± 11 млн. лет – 2080 ± 10 млн лет; [30]) мамонского комплекса ортопироксениты слагают ряд самостоятельных дайковых тел, сопровождающихся разномасштабным сульфидным платиноидно-медно-никелевым оруденением (Центральное рудопроявление; рис. 3; [24, 25]).

Сравнительный анализ минерального и химического состава руд Центрального рудопроявления, ассоциирующих лишь с мелкозернистыми биотитсодержащими ортопироксенитами, выявляет ряд черт, присущих оруденению еланского типа месторождений [8, 18, 24, 25]. Это сходство подтверждается: 1) высоконикелистым маломедистым (при повышенном содержании Co) составом руд ($\text{Ni}/\text{Cu} = 4,6-6,8$; $\text{Ni}/\text{Co} = 11,3-15,6$; $\text{S}/\text{Ni}+\text{Cu}+\text{Co} = 6,2-6,4$, табл. 1) общностью положения их полей составов (рис. 4) и количественных соотношений пирротина, пентландита и халькопирита; 2) обогащенностью руд легким изотопом серы ($\delta^{34}\text{S} = -1 \div -4,9 \%$; [21]) и пониженным содержанием Pt и Pd (см. табл. 1); 3) постоянным присутствием сравнительно высокохромистых хромшпинелидов [24, 25, 32].

Сульфидные платиноидно-медно-никелевые руды в ортопироксенитах, помимо главных (пирротин, пентландит, халькопирит, хромшпинелиды, магнетит), характеризуются широким комплексом второстепенных (графит, макинавит, молибденит, ильменит, кубанит, пирит, марказит) и редких (кобальтин, никелин, герсдорфит, смальтин-скуттерудит, раммельсбергит*, сфалерит, галенит, миллерит, халькозин, валлериит, золото, виоларит, платиновый минерал (?)*, тунгстенит*, гаухекорнит и др.) минералов при существенной роли среди них арсенидов и сульфоарсенидов Ni и Co (табл. 2).

* Минералы были обнаружены ранее и подтверждены лишь оптическими методами (Чернышов Н.М., Касатов А.С., неопубликованные материалы).

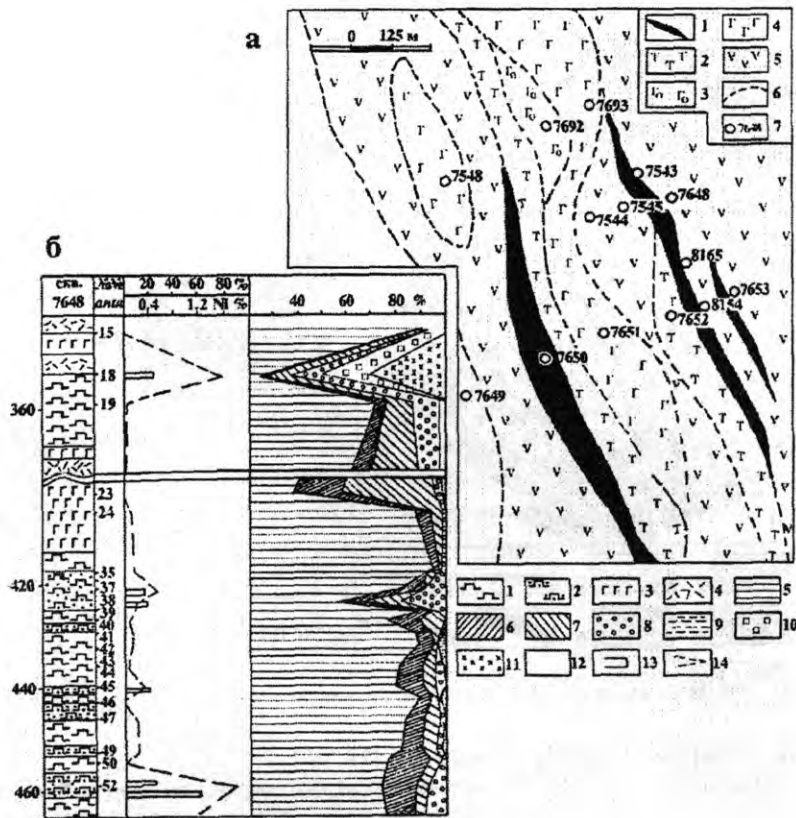


Рис. 3. Схематическая геологическая карта (а) и разрез (б) с количественно-минералогической характеристикой оруденения (скв.7648) Центрального рудопроявления (по: [24, 25]):

На карте: 1 – жильные ортопироксениты; 2-5 – интрузивные дифференциаты Елань-Коленовского массива: роговообманковое габбро (2), оливиновые (3), ортоклазосодержащие (4) и биотитовые габбронориты; 6 – границы между породами; 7 – скважины и их номера. На разрезе: 1 – ортопироксениты оливин и плагиоклазосодержащие среднезернистые безрудные; 2 – ортопироксениты средне- и мелкозернистые оруденелые; 3 – габбронориты оливиновые, ортоклаз- и биотитсодержащие; 4 – тремолитизированные и оталькованные породы; 5-12 – рудные минералы (отн. %): 5 – пирротин; 6 – пентландит; 7 – халькопирит; 8 – хромшпинелиды; 9 – магнетит; 10 – пирит и марказит; 11 – виоларит; 12 – прочие рудные минералы; 13 – интервалы отбора химических проб и содержание никеля (мас. %); 14 – содержание рудных минералов (абс. %)

Таблица 1

Содержание рудообразующих элементов (мас. %) и величины их отношений в рудах Еланского и Елкинского месторождений и Центрального рудопроявления

	1(42)	2(17)	3(17)	4(5)	5(14)	6(4)
S	4,02	12,87	4,37	21,49	6,19	15,47
Ni	1,31	5,48	0,41	1,35	0,78	1,70
Co	0,04	0,25	0,02	0,11	0,05	0,15
Cu	0,14	0,19	0,06	0,33	0,17	0,25
S/Ni	3,47	4,26	13,74	16,63	7,94	9,10
Ni/Cu	43,00	173,9	107,2	5,50	4,59	6,8
Ni/Co	78,15	245,8	19,26	23,93	15,60	11,33
S/Ni+Co+Cu	2,7	2,2	8,9	12,0	6,2	7,4
В 100% сульфидов						
Fe	47,92	44,52	57,74	58,84	56,53	56,86
Ni	12,38	16,18	3,57	2,39	4,79	4,17
Co	0,38	0,74	0,17	0,19	0,31	0,36
Cu	1,32	0,56	0,52	0,58	0,37	0,61
Pt г/г	0,041	0,146	—	—	0,019	0,031
Pd г/г	0,046	0,305	—	—	0,031	0,075
Pd/Pt	1,12	2,09	—	—	1,63	2,45

Примечание: 1, 3 – вкрапленные и 2, 4 – гнездово-прожилковые руды в норитах Еланского и Елкинского месторождений (соответственно, по [17]); 5 – вкрапленные и 6 – гнездово-шиповые руды в ортопироксенитах Центрального рудопроявления. В скобках – количество анализов. Расчет состава сульфидной фазы произведен при S = 38 % по средним содержаниям; содержание ЭПГ приведены в г/т.

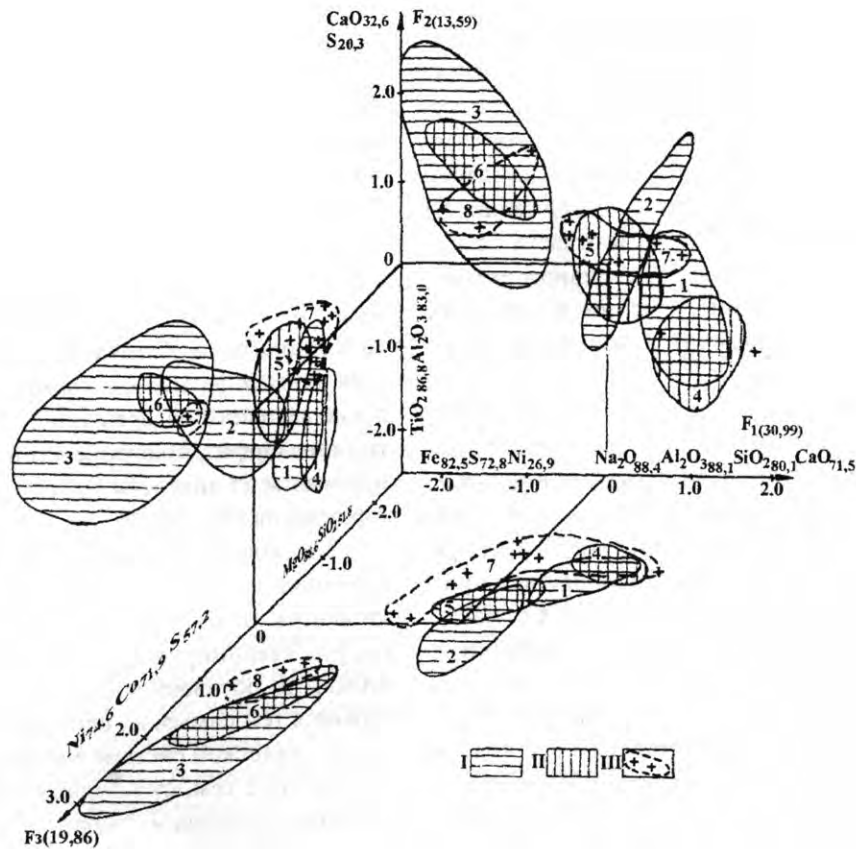


Рис. 4. Положение полей составов сульфидных медно-никелевых руд Еланского и Елkinsкого месторождений и Центрального рудопоявления на факторной диаграмме (по [24], с дополнениями):

1 – Еланское месторождение: 1 – вкрапленные, 2 – гнездово-прожилковые, 3 – массивные руды; II – Елkinsкое месторождение: 4 – вкрапленные, 5 – гнездово-прожилковые, 6 – массивные руды; III – вкрапленные (7) и вкрапленно-шировые (8) руды Центрального рудопоявления

Таблица 2

Химический состав (мас. %) сульфидов, арсенидов и сульфоарсенидов из руд Центрального рудопоявления

Минерал	n	Ni	Co	Fe	Cu	Zn	Mo	Cd	S	As	Sb	Bi	Сумма
1. Пирротин	2	0,37	—	59,55	—	—	—	—	40,24	—	—	—	100,16
2. Пирротин	3	0,67	—	59,66	—	—	—	—	40,46	—	—	—	100,59
3. Пентландит	2	35,95	0,92	29,84	—	—	—	—	32,95	—	—	—	99,66
4. Халькопирит	3	—	—	30,37	33,93	—	—	—	34,93	—	—	—	99,23
5. Пирит	2	0,86	0,25	44,36	—	57,1	—	1,37	53,74	—	—	—	99,21
6. Сфалерит	1	—	—	8,5	—	—	59,7	—	32,8	—	—	—	99,77
7. Молибденит	1	0,07	—	0,23	—	—	—	—	39,4	—	—	—	99,30
8. Виоларит	2	11,44	1,45	46,60	—	—	—	—	39,8	—	—	—	99,35
9. Миллерит	1	64,20	0,36	0,88	—	—	—	—	33,8	0,21	—	—	99,45
10. Миллерит	1	63,70	0,15	1,65	—	—	—	—	34,3	—	—	—	99,70
11. Никелин	2	44,36	0,14	0,07	—	—	—	—	0,11	54,56	0,58	—	99,82
12. Никелин	2	45,10	0,08	0,05	0,02	—	—	—	0,25	53,65	1,02	—	100,17
13. Кобальтин	3	5,59	26,18	3,27	—	—	—	—	18,75	44,85	0,12	—	98,56
14. Герсдорфит	2	32,74	2,15	1,78	—	—	—	—	19,63	42,76	1,53	—	100,59
15. Кобальтистый герсдорфит	1	19,7	10,5	4,90	—	—	—	—	19,80	44,4	0,14	—	99,44
16. Никелистый кобальтин	2	13,75	17,24	4,97	—	—	—	—	19,45	45,15	—	—	100,56
17. Гаухекорнит	1	26,9	0,27	0,48	—	—	—	—	15,4	1,72	52,3	0,97	98,94

Примечание: 1-2 – пирротин из вкрапленных (скв. 7543/425,6 м) и вкрапленно-шировых (скв. 7648/458,8 м) руд; 3 – пентландит из вкрапленно-шировых руд (скв. 7543/425,0 м); 4, 5 – халькопирит и пирит из густовкрапленных руд (скв. 7648/353,6 м); 6-7 – сфалерит и молибденит из вкрапленно-шировых руд (скв. 7543/370,1 м); 8 – виоларит (вкрапленные руды, скв. 7543/339,8 м); 9-10 – миллерит из вкрапленно-шировых и густовкрапленных руд (скв. 7543/327,2; 326,8 м); 11-14 – никелин, кобальтин и герсдорфит из вкрапленных, густовкрапленных и гнездово-вкрапленных руд (скв. 7653/418,9; 356,1; 359,9 м); 15-17 – кобальтистый герсдорфит, никелистый кобальтин, гаухекорнит, там же. Анализы выполнены на приборе MS-46 фирмы «Камека» (институт «Гипроникель» и ГИН Бурят. центра СО РАН); n – количество анализов.

Роговообманковое габбро относится к числу ограниченно распространенных пород еланского типа месторождений и представляет собой внутринтрузивную жильную фацию [33], характеризуюсь отчетливо секущими и лишь иногда постепенными переходами с меланократовыми разновидностями норитов*. Появление в них разномасштабного богатого по содержанию Ni (до 6,25 мас.%), Cu (до 0,87 мас. %) и отчасти Co (до 0,10 мас. %) и ЭПГ (до 0,54 г/т) сульфидного медно-никелевого оруденения связано, обычно, в случае их пространственного сонахождения с зонами рудоносных норитов [24].

Минеральный состав медно-никелевого оруденения в роговообманковых габбро характеризуется значительными чертами сходства с рудами в норитах еланского типа месторождений. Наряду с количественно преобладающими пирротин, пентландитом и халькопиритом в них в различных количествах присутствуют арсениды и сульфоарсениды Ni и Co, макинавит, хромшпинелиды, графит, ильменит, сфалерит и реже теллурувисмутит, аргентопентландит, гаухекорнит, миллерит. Особенностью руд, ассоциирующихся с роговообманковыми габбро, является высокое содержание в них пентландита (иногда до 40-55 об. %), а также сульфоарсенидов Ni и Co (до 4-6 %), повышен-

ные количества (до 16 %) халькопирита и пониженные хромшпинелидов.

Сравнительный анализ состава минералов ранней (халькопирит-пентландит-пирротиновой) и поздней (арсенид-сульфоарсенидной ± молибденит и др.) ассоциаций, а также хромшпинелидов в различных типах руд, генетически связанных с жильными габбро, выявляет (табл. 3): а) повышенное содержание Ni в пирротине и Ni и Co в пентландите прожилково-вкрапленных и массивных руд; б) наличие примесей Ni и Co в халькопирите; в) близкий к рудоносным норитам состав цинкосодержащих хромшпинелидов [25]; г) широкие вариации содержаний Fe, Ni, Co в ряду кобальтин-герсдорфит, присутствие в той же мере аналогичным минералам из никелевых руд в норитах Еланского месторождения [17, 18, 19].

Это сходство в известной мере проявляется в содержании и величинах отношений рудообразующих элементов в однотипных текстурных разновидностях руд, ассоциирующих с интрузивными норитами и жильными роговообманковыми габбро (табл. 4), подчеркивая тем самым их принадлежность к единой рудномагматической системе еланского типа.

Вместе с тем, сульфидные медно-никелевые руды в роговообманковом габбро заметно обогащены Cu,

Таблица 3

Химический состав (мас. %) сульфидов, арсенидов, сульфоарсенидов и теллуридов из руд, ассоциирующих с жильными роговообманковыми габбро Еланского месторождения

Минерал	n	Ni	Co	Fe	Cu	Mo	S	As	Sb	Te	Bi	Pb	Сумма
1. Пирротин	1	0,74	—	59,70	—	—	39,30	—	—	—	—	—	99,74
2. Пирротин	2	1,17	—	59,30	—	—	38,80	—	—	—	—	—	99,27
3. Пентландит	2	36,72	0,95	28,90	—	—	33,20	—	—	—	—	—	99,67
4. Пентландит		37,50	1,27	28,20	—	—	32,90	—	—	—	—	—	99,87
5. Халькопирит	1	0,11	—	30,29	34,50	—	35,00	—	—	—	—	—	99,80
6. Халькопирит	2	0,17	0,10	30,40	34,40	—	35,20	—	—	—	—	—	100,27
7. Никелин	1	44,10	0,11	0,13	0,07	—	0,15	53,50	1,03	—	—	—	99,09
8. Никелин	1	43,80	0,06	0,31	—	—	0,27	54,10	0,72	—	—	—	99,28
9. Кобальтин	2	4,73	23,73	5,64	—	—	20,10	44,70	—	—	—	—	98,80
10. Герсдорфит	1	17,15	11,30	6,54	—	—	19,10	44,75	—	—	—	—	98,84
11. Герсдорфит	1	14,97	11,52	7,15	—	—	19,60	44,90	—	—	—	—	98,14
12. Миллерит	2	65,10	0,37	0,85	—	—	34,30	0,35	—	—	—	—	100,97
13. Теллурувисмутит	1	0,15	0,07	0,12	—	—	—	—	0,21	47,70	49,80	1,81	99,96
14. Гаухекорнит	1	48,10	0,86	3,05	—	—	23,60	4,80	16,40	—	2,75	—	99,66
15. Макинавит	1	6,17	0,13	57,30	0,47	—	35,00	—	—	—	—	—	99,07
16. Пирит	2	0,63	0,03	45,50	0,05	—	52,90	—	—	—	—	—	99,11
17. Молибденит	1	0,05	0,18	—	—	59,60	39,00	—	—	—	—	—	99,86

Примечание: 1-2 – пирротин из вкрапленных (1) и массивных (2) руд; 3-4 – пентландит из вкрапленных (3) и прожилково-вкрапленных (4) руд; 5-6 – халькопирит из вкрапленных (5) и прожилков (6); 7-8 – никелин: вкрапленный в ассоциации с герсдорфитом (7) и среди пирротин-пентландитового агрегата (8); 9 – кобальтин, размещающийся среди пирротин-халькопиритового агрегата; 9-11 – кобальтин (9) и герсдорфит в краевой части зерна никелина (10, 11) из прожилково-вкрапленных и массивных руд; 12-15 – миллерит (12), теллурувисмутит (13), гаухекорнит (14), макинавит (15) и молибденит (17) из прожилково-вкрапленных и массивных руд; 16 – пирит в ассоциации с халькопиритом (скв. 7626/285,3; 288,5; 281,0 м).

* Некоторые исследователи [34] связывают появление роговообманкового габбро с самостоятельной порцией обогащенного флюидами магматического расплава, поступившего вслед за внедрением меланократовых норитов, сопровождающихся значительным объемом сульфидной жидкости.

Таблица 4

Содержание рудообразующих элементов (мас. %) и величины их отношений в сульфидных рудах, ассоциирующих с интрузивной фацией норитов и с жильными роговообманковыми габбро Еланского месторождения

№№ п/п	S	Ni	Co	Cu	S/Ni	S Ni+Co+Cu	Ni/Cu	Ni/Co	в 100% сульфидов			
									Fe	Ni	Co	Cu
1(42)*	4,02	1,31	0,04	0,14	3,07	2,7	9,36	32,93	47,92	12,36	0,38	1,32
2(17)	18,87	5,48	0,25	0,19	2,35	2,2	28,84	23,92	44,42	16,18	0,74	0,56
3(11)	24,82	8,01	0,19	0,07	3,10	3,0	114,4	42,16	49,34	12,26	0,29	0,11
4(3)	3,75	0,474	0,019	0,067	10,02	8,48	7,91	24,95	56,34	4,80	0,19	0,67
5(12)	10,77	3,422	0,052	0,285	2,86	2,86	12,01	65,81	48,80	12,07	0,18	1,01
6(1)	14,85	6,25	0,10	0,87	2,38	2,06	7,18	62,50	43,52	15,99	0,26	2,23

Примечание: 1-3 – вкрапленные (1), гнездово-прожилковые (2) и массивные (3) руды, ассоциирующие с норитами Еланского месторождения (по [18, 19]); 4-6 – вкрапленные (4), прожилково-вкрапленные, гнездовые (5) и массивные (6) руды в жильных роговообманковых габбро Еланского месторождения (скв. 7626); * в скобках – количество анализов; во вкрапленных рудах содержание ЭПГ 0,15 г/т, в прожилково-вкрапленных и гнездовых – 0,54 г/т.

содержат меньше Со, что существенно сказывается на величинах отношений Ni/Cu, Ni/Co и содержании этих металлов в 100 % сульфидов. Эти различия в составе руд отражают, вероятно, специфические условия формирования самих жильных роговообманковых габбро в результате реакции ортопироксена с флюидонасыщенным и обогащенным медью остаточным расплавом [25].

С рудами в жильных роговообманковых габбро определенные черты сходства обнаруживает богатое золото-платиносодержащее сульфидное кобальт-медисто-никелевое оруденение (табл. 5), выделяемое в особый *сульфидно-пегматоидный тип* [20].

Руды этого типа, секущие безрудные нориты и нориты с густовкрапленным сингенетическим оруденением, а также жильные норит-порфириды, характеризуются пологим залеганием рудных тел, заполняющими, очевидно, контракционные трещины. Последние формировались на стадии поздней консолидации интрузии норитов, уже несущих оруденение ранних стадий фракционирования рудно-силикатного расплава.

Судя по соотношению с силикатами, наличию четких, чаще пологих контактов с норитами, присутствию в рудах наряду с пентландитом значительных концентраций халькопирита, арсенидов и сульфоарсенидов никеля, зональному строению рудных тел с каймой в их эндоконтактах «щеток» крупнокристаллических (от 3-5 до 10 мм) выделений полисинтетических сдвойникованных кристаллов серицитизированного олигоклаза и биотита в рудной массе позднемагматические эпигенетические жилы золото-платиносодержащих сульфидных кобальт-медно-никелевых руд этого типа

несут отчетливые черты сульфидно-пегматоидных по своей природе расплавов, обогащенных флюидной фазой. Кроме того, об этом свидетельствует характерное для поздних стадий становления РМС еланского типа широкое развитие в составе высоконикелистых руд разнообразных арсенидов, сульфоарсенидов и антимонидов никеля и кобальта – никелина, герсдорфита, кобальтина, гаухекорнита, обычно обогащенных платиноидами [30], а также галенита, самородного золота, молибденита.

Пространственно-временная и генетическая взаимосвязь *жильных норит-порфиридов* преимущественно с порфиroidными и в целом с малорудными норитами [16, 23, 27, 35] определяет невысокое содержание в них сульфидной вкрапленности. При общем рассеянно-вкрапленном типе минерализации распределение рудных минералов в норит-порфиридах заметно отличается от рудоносных норитов [23]. Главный объем рудной вкрапленности (в виде тонкой сыпи) сосредоточен в основной массе, в которой сульфиды, магнетит и иногда ильменит выполняют интерстиции мелких кристаллов полевых шпатов и кварца, находятся в сростках с чешуйками биотита. Другая часть сульфидов представлена более крупными неправильными и округлыми вкрапленными выделениями, соизмеримыми с порфиroidными кристаллами ортопироксена, содержащими, в свою очередь, мельчайшие (< 0,03-0,05 мм) овальной, каплевидной и неправильной формы включения сульфидов и хромшпинелидов. В редких случаях вкрапленники сульфидов концентрируются в гнездово-шлировых (до 3,5-15 мм) образованиях.

Таблица 5

Содержание Ni, Co, Cu (мас. %) и благородных металлов (Pt, Pd, Au; г/т) в сульфидно-пегматоидных рудах Еланского месторождения

Интервалы рудных тел по стволу скв. 7614	Мощность, м	Ni	Co	Cu	Pt	Pd	Au
272,1–272,3	0,2	9,35	0,342	1,140	0,42	1,14	1,03
293,3–293,8	0,5	5,65	0,190	0,180	0,27	0,69	0,57
294,4–295,0	0,6	5,38	0,197	0,428	0,30	0,72	0,54
296,1–297,1	1,0	7,65	0,296	0,925	0,37	0,88	0,91

Химический состав сульфидов, арсенидов и сульфоарсенидов из вкрапленной минерализации в жильных норит-порфиритах Еланского месторождения (мас. %)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Fe	46,70	46,10	59,70	60,10	59,33	31,60	30,25	34,30	30,65	31,06	33,05	2,97	2,04	1,79	1,07	0,36	27,80	0,56	0,18
Ni	0,61	0,22	0,86	0,27	0,29	33,70	35,26	31,10	0,06	—	0,06	6,17	32,20	23,90	43,30	43,70	1,28	27,40	26,50
Co	0,12	0,08	0,12	—	—	0,29	0,17	0,51	—	—	0,15	26,30	2,16	12,00	0,12	0,11	6,70	0,36	0,10
Cu	—	—	—	—	0,06	—	—	—	33,08	32,11	—	—	—	—	0,05	0,03	—	—	—
S	53,10	53,70	40,20	39,90	39,55	33,90	33,81	33,55	34,89	35,37	19,90	18,65	19,30	18,70	0,18	0,16	18,20	15,20	15,30
As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	46,78	45,17	43,10	43,70	54,30	54,10	45,30	1,17	2,17
Sb	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	—	0,04	0,07	0,21	0,60	0,49	1,19	0,28	53,20	53,10
Bi	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,92	1,95
Σ	100,36	100,10	100,88	100,27	99,20	99,59	99,49	99,46	98,71	98,54	99,98	99,03	99,11	100,69	99,51	99,65	99,56	98,81	99,20

Примечание: 1-2 – пирит из сульфидных вкрапленников, скв. 7606/343,3 м; 3-5 – пирротин: 3 – из вкрапленников, 4-5 – из основной массы, скв. 7822/4660 м; 6-8 – пентландит: 6-7 – из вкрапленников и гнезд и 8 – из основной массы, скв. 7822/461,1 м; 9-10 – халькопирит из сульфидных вкрапленников, скв. 7606/343,3 м; 11 – арсенопирит из обособленного вкрапленника скв. 7613/535,5 м; 12 – кобальтин из краевой части пирротина, скв. 7822/461,0 м; 13 – герсдорфит, скв. 7822/461,1 м; 14 – кобальтистый герсдорфит, там же; 15-16 – никелин, там же; 17 – данаит, там же; 18-19 – ульманит из каемки вокруг никелина, скв. 7822/461,1 м, скв. 7606/344,3 м.

Для жильных норит-порфиридов, развитых среди рудоносных норитов, характерно тесное совмещение халькопирит-пентландит-пирротинового и арсенид-сульфоарсенидного (арсенопирит, никелин, кобальтин, минералы ряда кобальтин-герсдорфит, данаит, ульманит, маухерит) минеральных парагенезисов (табл. 6), а также спорадические находения в их составе молибденита, галенита, сфалерита.

Микрозондовыми исследованиями установлена [25] высокая степень неоднородности состава минералов: а) несколько повышенная железистость и пониженные концентрации Ni и Co в пирротине и снижение содержания Ni в пентландите из основной массы норит-порфиридов по сравнению с вкрапленниками и гнездами сульфидов; б) наличие арсенопирита и его кобальтистой разновидности – данаита; в) широкие вариации состава в ряду минералов, кобальтин-герсдорфит, ассоциирующих с никелином и ульманитом. Неоднородность состава была выявлена ранее [20] и для хромшпинелидов, включенных в ортопироксене ($Cr_2O_3 = 45,37-50,75$ мас. %) и основной массе ($Cr_2O_3 = 35,77$ мас. %).

По содержанию Ni, Co, Cu вкрапленные руды в норит-порфиритах являются крайне бедными (табл. 7);

лишь в случаях локального обогащения пород единичными крупными вкрапленниками и гнездами концентрация Ni достигает 0,35 мас. %. С неравномерным распределением сульфидов, арсенидов и сульфоарсенидов связаны широкие вариации величин отношений рудообразующих элементов, при этом во всех случаях (включая и данные по пересчету на 100 % сульфидов; см. табл. 7) в них сохраняются присущие рудам еланского типа незначительные концентрации Pt (до 0,01 г/т) и Pd (до 0,17 г/т).

В разработке общей модели формирования РМС еланского типа особое значение имеет выяснение характера взаимоотношений *диоритовой фазы и ее жильных отщепеней* с сульфидным медно-никелевым оруденением в норитах. Детальный анализ подобных взаимоотношений выявляет, с одной стороны, присутствие в диоритах ксенолитов оруденелых норитов и отчетливое пересечение ими промышленно рудоносных зон Еланского и Елkinsкого месторождений, а с другой – наличие в самих жильных диоритах рудной минерализации [25, 36]: а) в виде сульфидной (преимущественно халькопирит-пиритовая, иногда с пирротинном и графитом) и более сложного состава (пирит,

Таблица 7

Содержания (мас. %) и величины отношений рудообразующих элементов во вкрапленной минерализации жильных норит-порфиридов Еланского месторождения

№№ п/п	S	Ni	Co	Cu	S/Ni	S Ni+Co+Cu	Ni/Cu	Ni/Co	в 100 % сульфидов			
									Fe	Ni	Co	Cu
1	1,25	0,10	0,004	0,06	12,50	7,62	1,67	25,00	55,02	3,04	0,12	1,82
2	0,90	0,12	0,003	0,06	7,50	4,92	2,00	40,00	54,27	5,07	0,13	2,53
3	1,14	0,04	0,004	0,021	28,50	1,75	20,0	10,00	59,74	1,33	0,13	0,70
4	1,06	0,04	0,006	0,020	26,50	16,06	2,00	6,67	59,63	1,43	0,22	0,72
5	0,77	0,055	0,006	0,013	14,10	13,51	4,23	9,17	58,35	2,71	0,30	0,64
6	0,55	0,07	0,003	0,010	7,86	6,62	7,00	23,33	56,27	4,83	0,21	0,69
x	0,94	0,07	0,004	0,013	16,16	8,41	6,15	19,03	57,21	3,07	0,18	1,18

Примечание: норит-порфириды с сульфидной вкрапленностью; Еланское месторождение: 1 – скв. 7606(1)/343,3 м; 2 – скв. 7813/535,5 м; 3 – скв. 7822/461,0 м; 4 – скв. 7823/313,0 м; 5 – скв. 7823/492,0 м; 6 – скв. 7823/294,0 м.

марказит, арсенопирит, пирротин с пламенеvidными вростками пентландита, халькопирит, кобальтин, герсдорфит, графит) вкрапленности; б) кварцево-карбонатных и кварцевых жил с прожилками арсенопирита, ассоциирующего с арсенидами Ni и Co (герсдорфит, кобальтин, данаит) и самородным золотом, отчетливо секущими диориты.

Микрозондовыми исследованиями установлено (табл. 8): а) близость химического состава арсенопирита из вкрапленников и тонких прожилков и постоянное присутствие в нем Co, Ni, Sb; б) широкие вариации состава минералов в ряду кобальтин-герсдорфит (от собственно герсдорфита с повышенным содержанием Co до никелистого кобальтина); в) наличие в арсенидном парагенезисе данаита; г) обогащенность пирита и отчасти марказита Co и Ni; д) повышенные концентрации в самородном золоте Ag (Au = 81,9 мас. %, Ag = 18,4 мас. %); е) наличие в составе халькопирита As (0,32 мас. %).

Важной особенностью диоритов с сульфидной минерализацией является несколько повышенное содержание S (до 0,30-0,48 %) и заметные вариации $\delta^{34}\text{S}$ (от -2,2 ‰ до -5,6 ‰ [21]). По видовому и химическому составу вкрапленный и прожилковый типы минерализации в жильных диоритах обнаруживают некоторую аналогию с поздним арсенид-сульфоарсенидным минеральным парагенезисом медно-никелевых руд Еланского и Елkinsкого месторождений в норитах, подчеркивая тем самым длительность формирования многофазной рудообразующей системы еланского типа.

Таким образом, разномасштабные сульфидные платиноидно-медно-никелевые рудопроявления, ассоциирующие с жильными породами, характеризуются рядом специфических, присущих основным рудным залежам еланского типа месторождений, рудно-геохимических признаков: а) однотипным минеральным парагенезисом, который определяется высоким содержанием пентландита при ведущей роли пирротина и более широким (в рудах жильных пород) в количественном распространении халькопирита постоянным присутствием высокохромистых цинксодежащих хромшпинелидов, аргентопентландита, кубанита; б) совмещением раннего халькопирит-пентландит-пирротин-

нового и позднего кобальт-никелевого арсенид-сульфоарсенидного парагенезиса (кобальтин, герсдорфит, никелин, данаит, ульманит, смальтин-скуттерудит, раммельсбергит), ассоциирующими с гаухекорнитом, валлериитом, молибденитом, арсенопиритом, тунгстенином, платиновым минералом (?), теллуровисмутитом, миллеритом, сфалеритом, борнитом, макинавитом, самородным золотом, пиритом, галенитом и др. [22, 23, 24, 25, 37]; в) маломедистым высоконикелистым (с повышенными концентрациями Co) составом руд, обогащенных изотопно легкой серой и широким комплексом попутных (Au, Ag, ЭПГ, Se, Mo, Te) компонентов.

3. Положение ассоциирующих с дайками сульфидных медно-никелевых руд в общей модели петрогенеза и формирования еланского типа месторождений

Установление места, времени и условий образования сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд в жильных породах базируется на ранее разработанной общей петролого-генетической модели формирования еланского типа месторождений, ассоциирующих с норитами [16, 18, 19, 35, 38]. В соответствии с этой моделью процесс кристаллизации контаминированного по своей природе расплава был достаточно длительным по времени, и в его эволюции с определенной степенью условности выделены [19, 35, 39] три стадии: а) ранняя стадия докамерной кристаллизации, характеризующаяся выделением из мафитового расплава ликвидусной оливин-хромшпинель-ортопироксеновой (\pm плагноклаз) ассоциации, которая в норитах и их жильных комагматах [23, 25] представлена фенкристаллами этих минералов; б) стадия внутрикамерной кристаллизации интеркумулусного парагенезиса $\text{Orx} + \text{Crx} + \text{Pl} + \text{Vi} + \text{Ort}$ и формирования внутриинтрузивных дайковых комагматов; в) заключительная позднемагматическая стадия с широким проявлением процесса аутометасоматоза с участием флюидной фазы, выразившейся в

Таблица 8

Химический состав (мас. %) рудных минералов, встречающихся среди жильных диоритов еланского типа месторождений

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	32,97	33,10	28,68	28,83	14,95	6,80	6,72	3,36	44,93	45,60
Ni	0,03	0,04	1,92	0,84	12,53	7,69	13,21	5,73	0,34	0,72
Co	0,19	0,20	5,10	5,11	9,51	21,78	15,94	25,90	1,57	0,57
S	19,87	19,95	19,20	18,87	18,68	19,15	18,70	18,82	53,10	52,80
As	46,86	46,95	46,03	45,86	44,50	44,78	45,15	44,78	—	—
Sb	0,03	0,03	0,02	0,03	0,06	—	—	0,07	—	—
Сумма	99,95	100,27	100,94	99,54	100,23	100,21	99,72	98,66	99,97	99,79

Примечание: 1 – арсенопирит из вкрапленников (скв. 7606(I)/270 м); 2 – арсенопирит из прожилка, секущего диориты и полевошпатовые породы еланского комплекса (скв. 7847/296,3 м); 3-4 – данаит (скв. 7847/296,3 м; скв. 7606(I)/270 м); 5 – кобальтистый герсдорфит (скв. 7687/275,4 м); 6-7 – никелистый кобальтин (скв. 7847/296,3 м; скв. 7606(II)/333,6 м); 8 – кобальтин (скв. 7606(I)/333,6 м); 9 – пирит (скв. 7687/275,4 м); 10 – марказит по пирротину (там же).

замещении пироксенов амфиболом и наиболее полно проявившейся в дайках пироксеносодержащего роговообманкового габбро [25]. Некоторые петрологические параметры длительно эволюционирующей норит-диоритовой магматической системы еланского типа, дополненной комплексом жильных (дайковых) пород, приведены на рис. 5.

Выполненные на модельном исходном высококремнеземистом магниальном расплаве расчеты с использованием ряда известных уравнений [39, 41, 42, 43] показали, что наиболее высокими термобарическими параметрами характеризовалась стадия докамерной кристаллизации. Как отмечалось, температура ликвидусного оливина составила от 1282 до 1312 °С; наиболее магниальный ортопироксен ($X^{\text{Orx}} = 91$) появляется на ликвидусе 1308 °С. Принадлежность исходной магмы еланского типа к высококремнеземистым магниальным расплавам определяет [19, 35, 39, 40] смену на ликвидусе оливина пироксеном при давлении около 6 кбар (см. рис. 5 в), что в полной мере согласуется с известными экспериментальными данными по

исследованию фазовых взаимоотношений в основных (мафических) магмах при различных барических параметрах [40, 43].

Стадия камерной кристаллизации отличалась пониженными значениями РТ-условий минералообразования. Выполненные с использованием ортопироксенового геотермометра и различных вариантов двухпироксеновой термометрии расчеты [35, 38, 39] свидетельствуют о температурном интервале кристаллизации пироксенов 898 – 1195 °С; начало кристаллизации плагиоклаза по ликвидусному термометру плагиоклаз–расплав [48] осуществлялось в температурном интервале 1145 – 1194 °С в условиях значительного снижения давления [35, 39].

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 [20, 25]. Согласно расчетам

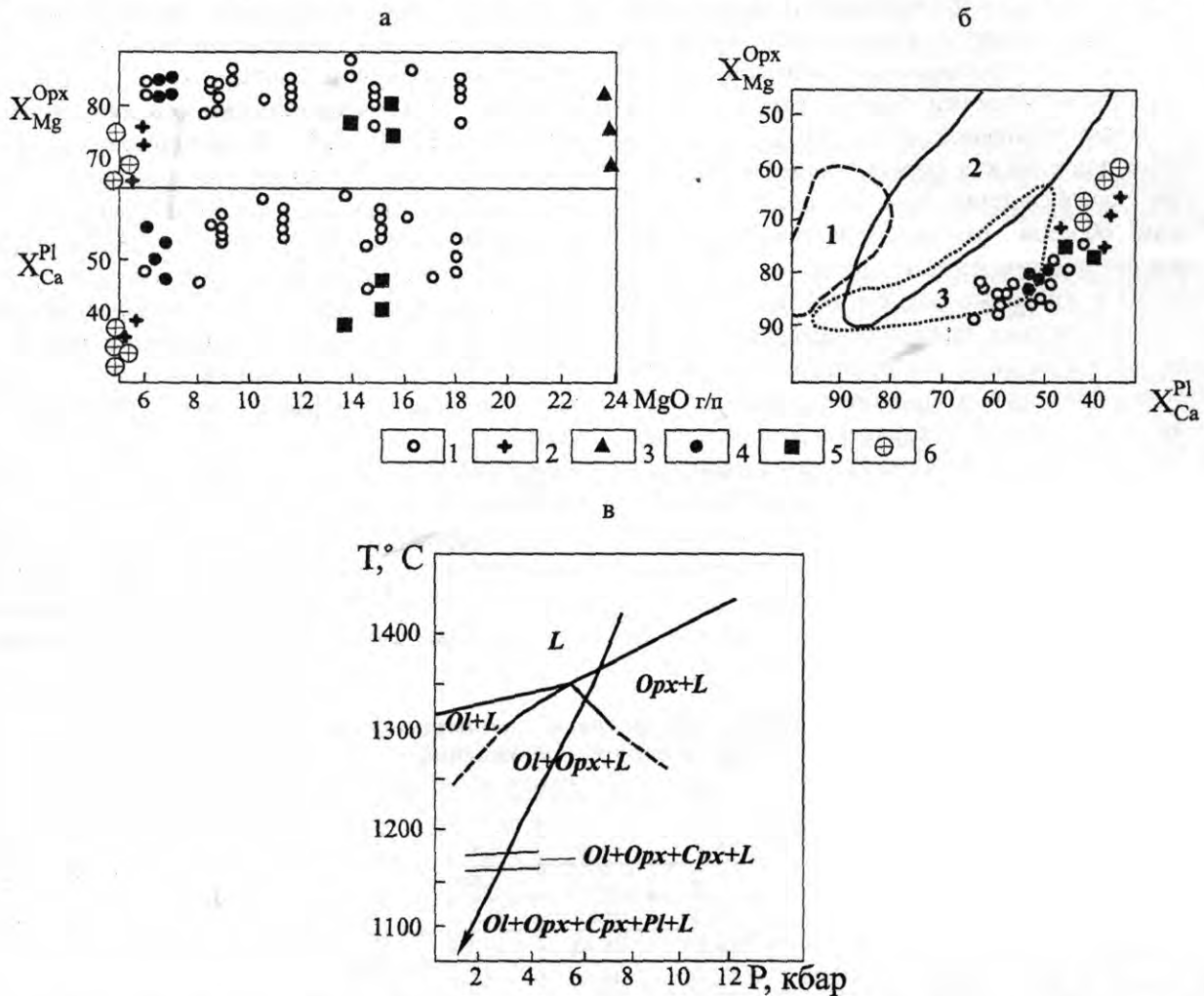


Рис. 5. Некоторые петрологические параметры формирования ортопироксенит-норит-диоритовых интрузий и их жильных (дайковых) комагматов (по: [38, 39] с дополнениями автора): 1-2 – интрузивные нориты (1) и диориты (2); 3-6 – жильные ортопироксениты (3), норит-порфириты (4), роговообманковое габбро (5), диориты (6); а – график зависимости состава ортопироксена и плагиоклаза от содержания MgO во вмещающих их породах; б – диаграмма зависимости $X_{Mg}^{Orx} - X_{Ca}^{Pl}$ для габброидов: 1 – островных дуг, 2 – расслоенных интрузий, 3 – срединно-океанических хребтов; в – РТ-фазовая диаграмма для пород закалочной фации Буивельдского плутона [40]; жирной стрелкой показан рассчитанный путь кристаллизации исходного расплава Еланского норитового интрузива

[38, 39, 44], основанным на зависимости состава амфиболов от температуры [45], давления [46] и f_{O_2} [33], замещение пироксенов амфиболом происходило при $T = 558-609$ °С, $P = 1,4-1,5$ кбар и невысокой (близкой к f_{O_2} буферного равновесия железо-вюстит) фугитивности кислорода.

Многофазная природа еланского никель-платиноидного комплекса, неупорядоченное чередование и текстурно-структурная и кристалломорфологическая неоднородность интрузивных дифференциатов и их дайковых производных внутри отдельных фаз, многообразии структур, неравновесный характер минеральных ассоциаций, обогащенность водофлюидонасыщенными 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 самостоятельных порций магматических расплавов, каждая из которых представляла собой автономную (в пределах фаз) петрогенетическую систему.

Степень избирательного концентрирования и распределения рудообразующих (Ni, Cu, Co, ЭПГ) элементов в таких автономных интрузивно-дайковых системах определяется не только P и f_{O_2} , но и рядом других факторов: а) количеством и составом несмешиваемой сульфидной жидкости в расплаве и временем ее отделения [12, 35, 39, 47, 48, 49, 50]; б) характером фракционной кристаллизации [12, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57]; в) уровнем химических потенциалов S, As, Sb [15, 17, 58].

Петролого-геохимическая индивидуальность никель-платиноносных интрузивно-дайковых образований, характер слагающих их минеральных парагенезисов и особенности распределения в них сульфидов во многом определяются режимом щелочности [42]. В частности, 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 [24, 25, 37, 42]. 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. [24, 25, 37] образуют интерстиционную вкрапленность, переходящую в некоторых участках в шпировые выделения; реже – это мелкие каплевидные образования в пироксене и биотите. Взаимоотношения минералов свидетельствуют о вероятности выделения основной массы сульфидов одновременно с кристал-

лизацией мелкозернистых пироксенитов, которые по отношению к вмещающим их крупнокристаллическим образованиям рассматриваются [42] как продукты консолидации сегрегаций остаточного расплава. Мелкозернистый облик пород и насыщенность их сульфидной вкрапленностью с широким комплексом сопутствующих им арсенидов и сульфоарсенидов 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 [42].

Присутствие биотита в качестве одного из наиболее распространенных после ортопироксена минералов свидетельствует о формировании рудных пироксенитов и содержащейся в них сульфидно-арсенид-сульфоарсенидной фракции при достаточно высоком потенциале μ_{K_2O} [42]. При относительно высоких потенциалах Na_2O в области малых значений μ_{K_2O} образовывались роговообманковосодержащие (\pm плагиоклаз) средне-крупнозернистые ортопироксениты с крайне бедной сульфидной минерализацией.

Построенная в координатах $\mu_{Na_2O} - \mu_{K_2O}$ мульти-система (рис. 6) позволила в свое время [42] оценить условия образования обычного для рудных пироксенитов парагенезиса Нур+Вi+Р по отношению к возможным в этой системе дивариантным комбинациям*.

Бессульфидный и беспироксеновый пучки на диаграмме располагаются в поле расплава, т.е. раскристаллизация последнего неизбежно приводила 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 (Нур+Р+Pl, Нур+Р+Нb и Нур+Р+Вi) 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 .

Тесная пространственно-временная связь богатых по содержанию рудообразующих элементов роговообманковых габбро внутриинтрузивной жильной фации с рудовмещающими норитами Еланского месторождения, с которыми образуют отчетливые секущие и лишь иногда постепенные переходы, а также значительные черты сходства сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд по концентрации и величинам отношений

* Исходные данные для расчета моновариантных линий и их константы приведены в [19, 42].

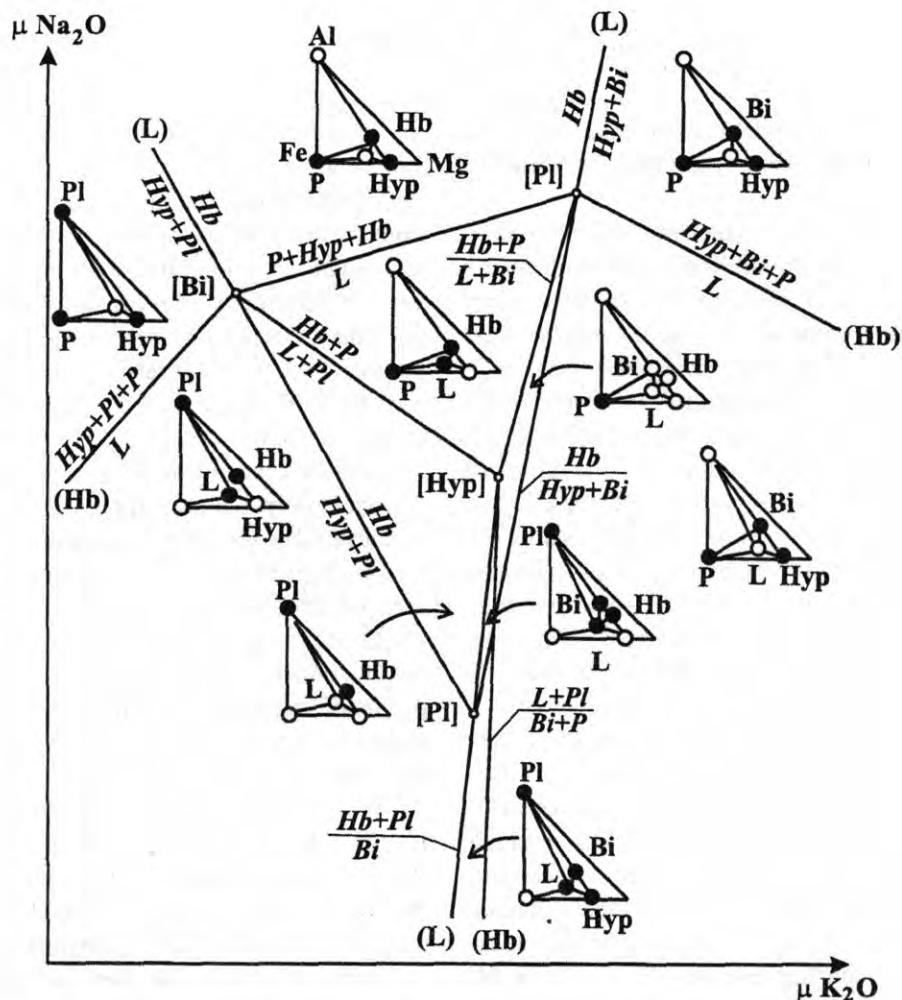


Рис. 6. Фазовые равновесия в ортопироксенитах Центрального рудопроявления (по: [19, 42]):
 принятые обозначения: *Hyp* – ортопироксен; *Hb* – роговая обманка; *Bi* – биотит; *Pl* – плагиоклаз; *L* – расплав; *P* – сульфиды

Ni, Cu, Co, ЭПГ (рис. 7 а-б), минеральным парагенезисам и другим рудно-геохимическим признакам [25], 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 [15, 16, 19, 35, 38, 39, 59].

Как известно [15, 17, 18, 19, 61], характерной особенностью высоконикелистых маломедистых кобальтсодержащих руд еланского типа является низкая (по сравнению с коматиит-ассоциированными месторождениями [12]) суммарная концентрация платиноидов, сопоставимая с месторождениями Монткалм и Рана [52], в которых имело место раннее отделение сульфидов (см. рис. 7 в). Более крутой (по сравнению с коматиитами) наклон профиля ЭПГ в рудах, ассоциирующих как с норитами интрузивной фации, так и с жильными роговообманковыми габбро, отражает контаминированную природу исходного расплава [16, 35, 38, 39], а наличие рутениевого минимума является, вероятно, результатом удаления из расплава еще на ранних стадиях его эволюции хромита, с которым предположительно ассоциируют лаурит – RuS₂ [19, 32, 35, 38].

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 [49, 52]. Количество сульфидного вещества, отделившегося до внедрения расплава в камеру современного залегания, было определено по уравнению Рэлея [52]. На основании использования представленных в [48] значений коэффициентов распределения ЭПГ между сульфидной и силикатной жидкостями ($D_{ЭПГ}=1000$), было установлено, что столь значительное (трех-, пятикратное) обеднение платиновыми металлами руд еланского типа относительно типичных коматиит-ассоциированных месторождений может быть достигнуто при раннем отделении из расплава 0,16 % сульфидного вещества [35, 38, 39].

В связи с обсуждением вопроса о положении ассоциирующих с дайками сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд в общей модели петрогенезиса и формирования еланского типа месторождений представляется целесообразным рассмотреть ряд известных [19, 35, 38] бинарных диаграмм (рис. 8), которые иллюстрируют зависимость между ЭПГ, Ni и Cu во всей совокупности интрузивных и жильных пород и ассоциирующих с ними руд. В соответствии с извест-

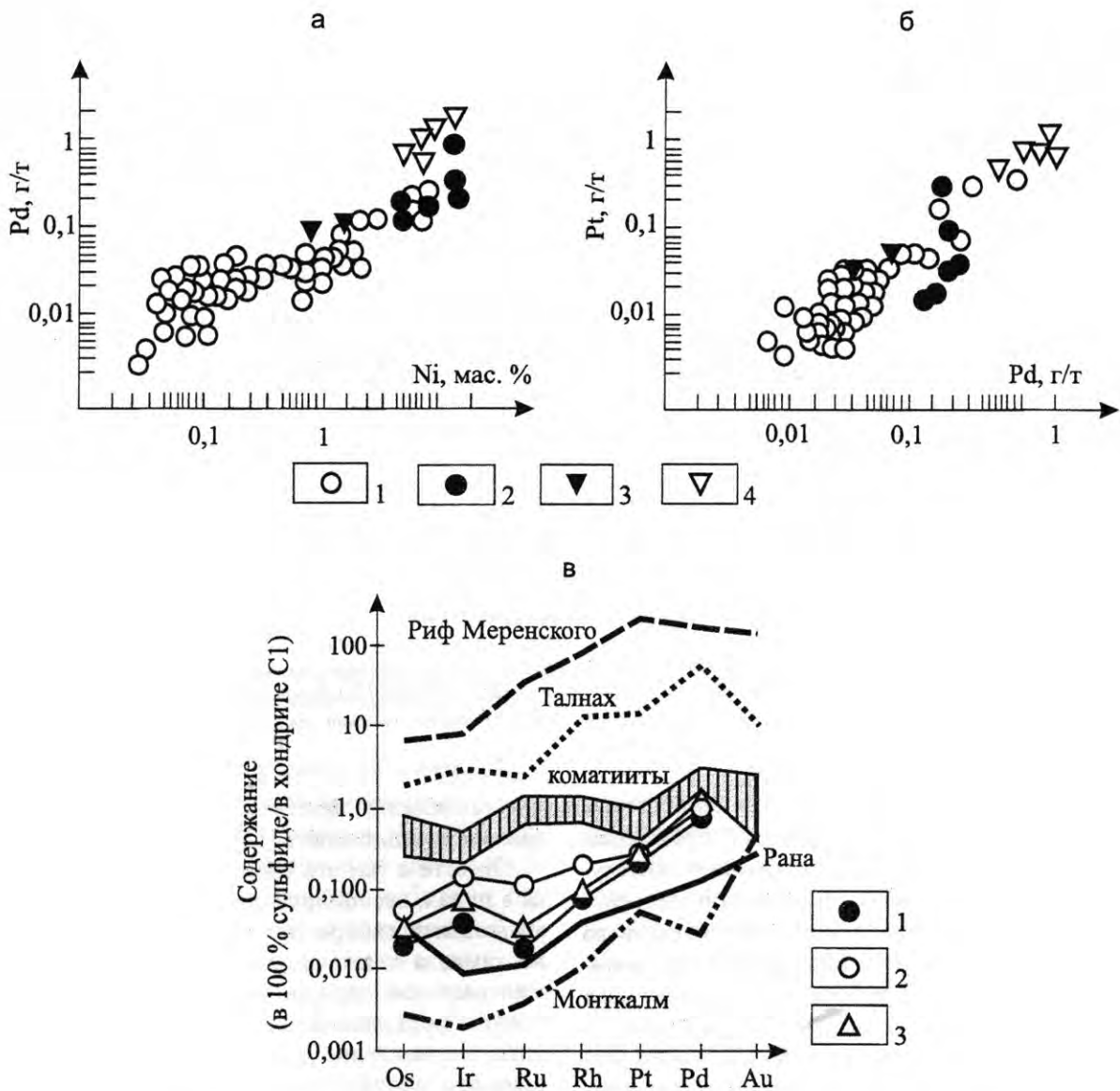


Рис. 7. Особенности распределения Pt, Pd и Ni (а, б) и сравнительная характеристика распределения ЭПГ (в) в рудах различных типов месторождений (по: [19, 35, 38, 60, 61] с дополнениями автора):

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-шиповые 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 [12, 52]): 1-2 – средний состав вкрапленных (1) и массивных (2) руд Еланского месторождения; 3 – состав богатых гнездово-прожилково-вкрапленных и гнездово-шиповых руд в жильных роговообманковых габбро и их пегматоидных разновидностях

ными представлениями [12, 13, 50] фракционная кристаллизация комагититового 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 [50]. С другой стороны, раннее отделение сульфидного вещества обуславливает обеднение последующих порций сульфидной жидкости платиноидами относительно Ni и Cu, увеличивая тем самым отношения Ni/ЭПГ в рудах [50, 52]. Расположение фигуративных точек состава пород интрузивной и жильной (дайкиной) фаций и ассоциирующихся с ними руд Еланского месторождения

на рис. 8 удовлетворительно согласуется с подобной интерпретацией.

Особенности распределения Ni, Cu и ЭПГ в рудах еланского типа месторождений и рудопроявлений позволили наметить генерализованную схему фракционирования сульфидного расплава [19, 35, 38, 39], несмешивающаяся жидкость которого представляет собой [12, 47] 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 твердо-

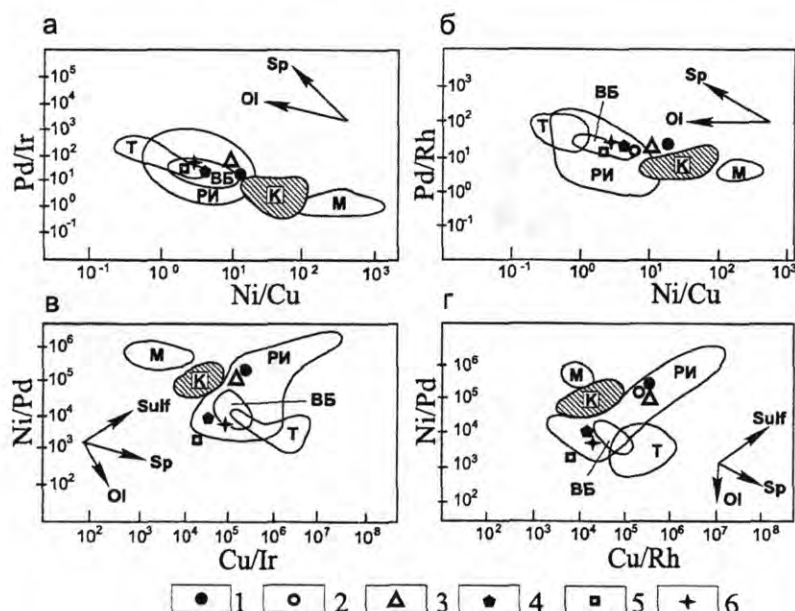


Рис. 8. Диаграмма зависимостей (по: [19, 35] с авторскими дополнениями):

a – Pd/Ir-Ni/Cu; *б* – Pd/Rh-Ni/Cu; *в* – Ni/Pd-Cu/Ir; *г* – Ni/Pd-Cu/Rh применительно к породам и рудам Еланского месторождения: 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-порфириды; М – мантия, К – коматииты, 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)

го 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 [47] 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 [12].

С рассматриваемых позиций становится очевидным и высокое содержание ассоциирующих с норитами массивных руд 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 [15] при анализе парагенетической диаграммы в системе координат $\mu\text{O}-\mu\text{S}$ (рис. 9). 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 [15].

Вместе с тем эта схема существенно нарушается в рудах, ассоциирующих с жильными роговообманковыми габбро, их пегматоидными разновидностями, а также норит-порфиридами, 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; см. табл.1; 4; 5; 7). Их положению на парагенетической диаграмме в большей мере отвечает II ветвь кристаллизации с выделением халькопирита (см. рис. 9). 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 [23, 25]), а также составу минеральных рудообразующих парагенезисов и петрогеохимическим признакам, представлял собой обогащенный флюидами конечный (автономный) продукт отдельных дифференциатов кристаллизующейся норитовой рудно-магматической системы [25].

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

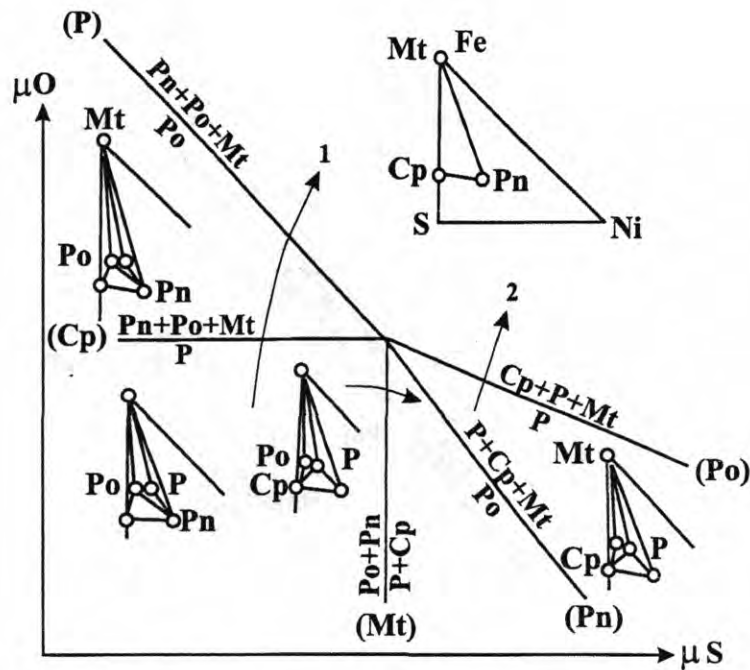


Рис. 9. Парагенетическая диаграмма медно-никелевых руд Еланского месторождения в системе координат $\mu\text{O}-\mu\text{S}$: P – сульфидный расплав; Po – пирротин; Pn – пентландит; Cp – халькопирит; Mt – магнетит; no: [15]

дайках арсенидно-сульфоарсенидной минеральной ассоциации с широкими вариациями химического состава и повышенными концентрациями ЭПГ [20, 24, 25, 37 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) рудами в дайковых образованиях с сульфидными платиноидно-медно-никелевыми рудами в интрузивных норитах позволяют использовать известные парагенетические диаграммы, разработанные [15] применительно к Еланскому месторождению (рис. 10; 11). Эти диаграммы наиболее полно отражают основные параметры рудообразующей системы, последовательность и температуру кристаллизации минералов, поведение подвижных компонентов и т.п.

Анализ известной [15] моновариантной мульти-системы в координатах $\mu\text{S}-\mu\text{As}$, 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. 10), 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, дает основание считать [15, 17, 19], 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 сульфидоарсенидами промежуточного состава (никелистый кобальтин, кобальтистый герсдорфит, кобальтистый никелин, кобальтин-герсдорфит, кобальт-никелевый леллингит и др. [17, 18, 19, 20, 25, 37]) отражают вероятность их образования в относительно высокотемпературных условиях и подтверждается экспериментальными данными о смесимости Ni, As, S и Co, As, S при $T > 600^\circ\text{C}$ в любых соотношениях с образованием твердых растворов различного состава. При более низких ($< 500^\circ\text{C}$) 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 также известная [15, 19] парагенетическая диаграмма Ni – Co – As при различных уровнях $\mu\text{S}-\mu\text{Cu}$ (см. рис. 11). Для получения более объективных данных в состав никель-кобальтового парагенезиса условно включен отсутствующий в рудах еланского типа месторождений теннантит, стабильность и степень распространенности которого в среднетемпературных кобальт-никелевых месторождениях определяется режимом μCu [4].

Полный вариант мультисистем рассмотрен в [15, 19]. Здесь же важно подчеркнуть, что по мере сниже-

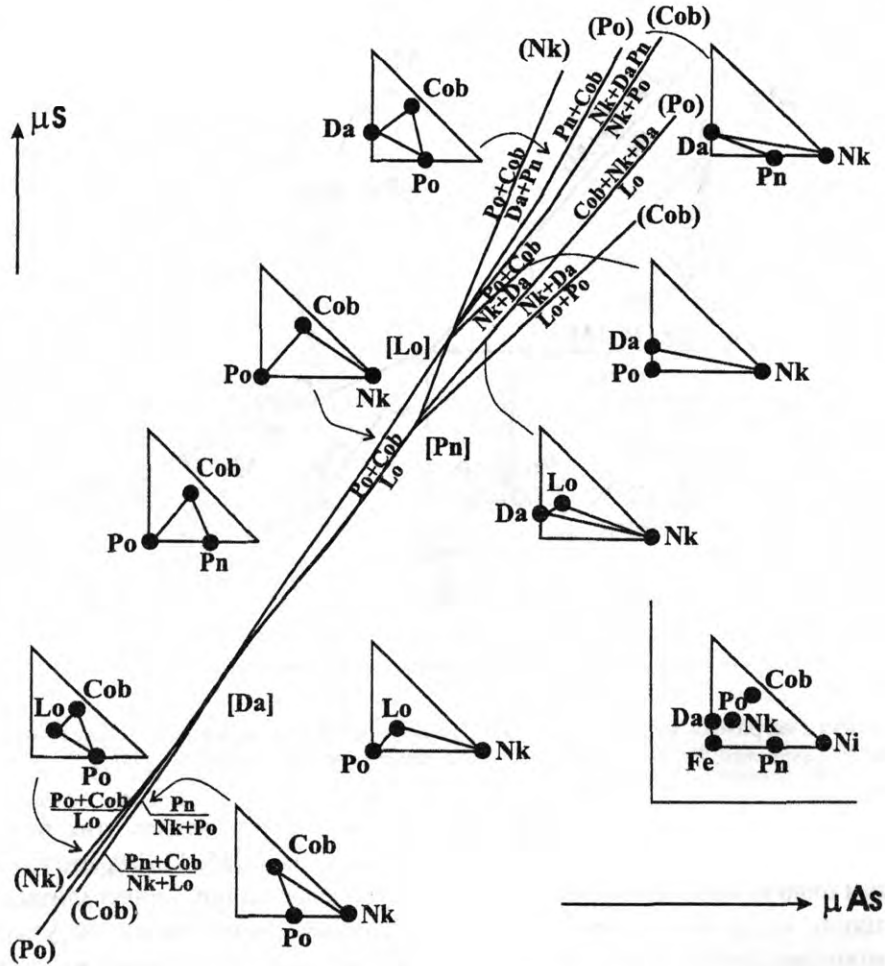


Рис. 10. Парагенетическая диаграмма арсенидной и сульфоарсенидной ассоциации руд Еланского месторождения в зависимости от химического потенциала S и As:

Po – пирротин, Pn – пентландит, Cob – кобальт-герсдорфит, Nk – никелин, Da – данаит, Lo – леллингит; по: [15]

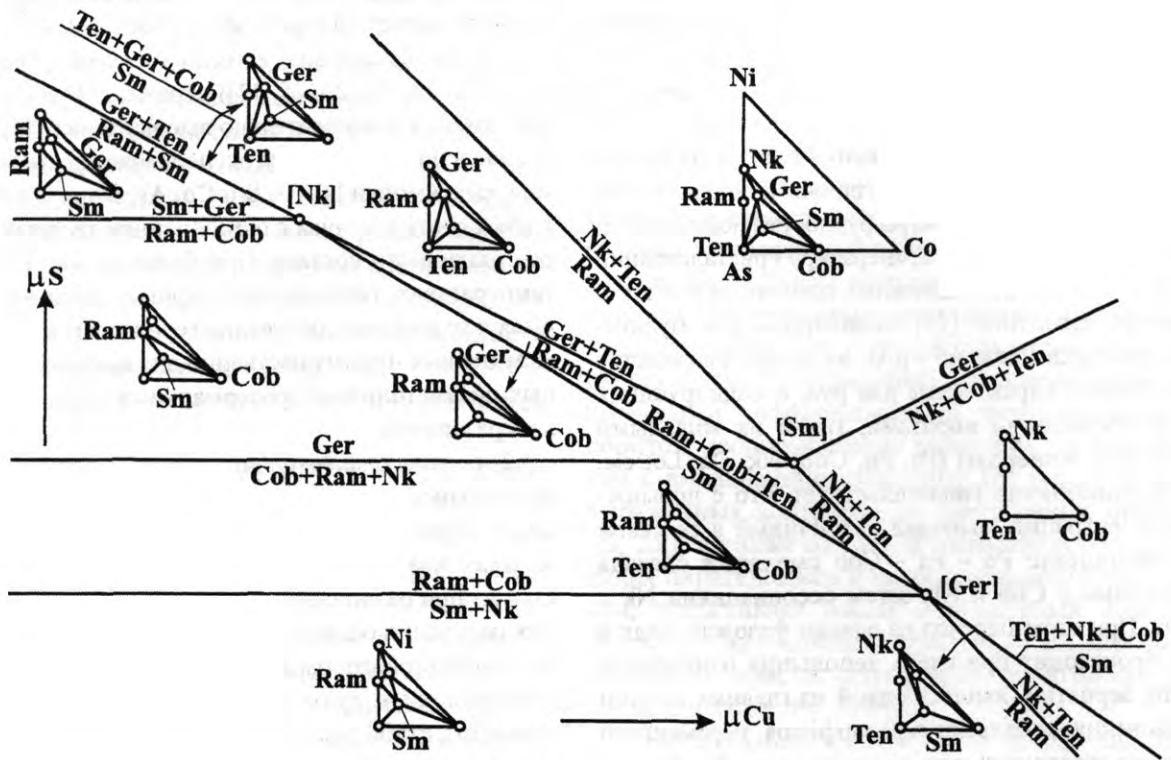


Рис. 11. Парагенетическая диаграмма медь-никель-кобальтовой арсенид-сульфоарсенидной минеральной ассоциации руд Еланского месторождения в системе координат μS - μCu :

Nk – никелин, Cob – кобальтин, Ger – герсдорфит, Ram – раммельсбергит, Sm – смальтин, Ten – теннантит; по: [15]

ния температуры минералообразования и все более полного перехода серы во вполне подвижные состояния происходит закономерная смена четырех (бестенантитовых) 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 [19]

В целом же в процессе кристаллизации сульфидоносного расплава и образования рудных тел в вулканно-интрузивно-дайки петрорудогенетической системе происходила последовательная смена пентландит-пирротинного (с ограниченной ролью халькопирита) парагенезиса кобальт-никелевым арсенид-сульфоарсенидным в условиях понижающейся температуры и все более полного перехода серы во вполне подвижное состояние [15, 19].

Важно особо 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-дайки породной ассоциацией длительную эволюцию.

Выводы

Таким образом, характер взаимоотношения даек и оруденения еланского типа месторождений, длительный полихронный процесс формирования сульфидной платиноидно-медно-никелевой РМС определяются многофазной природой никель-платиноносного комплекса, в котором наряду с главной массой руд в норитах значительными концентрациями рудообразующих металлов 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 и их пегматоидные разновидности 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. Диориты завершающей фазы являются послерудными, редкая сульфидная минерализация в которых в известной мере наследует рудно-геохимические признаки, присущие длительно формирующейся РМС еланского типа.

Общность структурно-вещественных, рудно- и изотопно-геохимических признаков дайковых пород и связанных с ними разномасштабных сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудопоявлений с интрузивными дифференциатами и основными рудными залежами еланского типа месторождений подтверждает контаминированную природу исходного магматического расплава, сформировавшегося в результате ассимиляции сульфидоносной мантийной ультраосновной (коматиитовой) магмы пород континентальной коры при ее продвижении к поверхности и неоднократном внедрении 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 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 автономный продукт отдельных дифференциатов еланской интрузивно-дайки-рудообразующей системы. В процессе кристаллизации сульфидоносного расплава и образования руд в длительно формирующейся интрузивно-дайки петрорудогенетической системе происходила последовательная смена пентландит-пирротинного и халькопирит-пентландит-пирротинного парагенезиса обогащенным платиноидами кобальт-никелевым арсенид-сульфоарсенидным в условиях понижающейся температуры, умеренных и варьирующих значений потенциалов мышьяка и серы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-05-96408 ичр).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуллаев, Х.М.* Дайки и оруденение / Х.М. Абдуллаев. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 232 с.
2. *Горбунов, Г.И.* Геология и генезис сульфидных медно-никелевых месторождений Печенги / Г.И. Горбунов. – М.: Недра, 1968. – 352 с.
3. *Ефремова, С.В.* Дайки в гранитных комплексах Центрального Казахстана / С.В. Ефремова. – М.: Наука, 1970. – 237 с.
4. *Ефремова, С.В.* Дайки и эндогенное оруденение / С.В. Ефремова. – М.: Недра, 1983. – 224 с.
5. *Индолев, Л.Н.* Дайки рудных районов Восточной Якутии / Л.Н. Индолев. – М.: Наука, 1979. – 193 с.
6. *Козлов, Е.К.* Естественные ряды пород дифференцированных интрузий Кольского полуострова и их металлогения / Е.К. Козлов. – Л.: Наука, 1973. – 288 с.
7. *Конников, Э.Г.* Соотношение постплутонических даек и эпигенетических сульфидных руд медно-никелевых месторождений / Э.Г. Конников, А.А. Цыганков // Докл. РАН. – 1997. – Т. 354, № 4. – С. 520-523.

8. Чернышова, М.Н. Петрохимические особенности жильных пород еланского никеленосного комплекса / М.Н. Чернышова // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. геология. – 2001. – № 11. – С. 88-97.
9. 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.
10. Thorne Kathleen, G. Geochemistry and petrogenesis of the East Branch Brook metagabbroic dykes in the Sawyer Brook fault zone, Clarence Stream gold prospect, southwestern New Brunswick / G. Thorne Kathleen, R. Lentz David // Atlant. Geol. – 2001. – № 2-3, V. 37. – P. 175-190.
11. Wilson Allan, H. Platinum-group element mineralization in the Great Dyke, Zimbabwe, and its relationship to magma evolution and magma chamber structure / H. Wilson Allan, D. Prendergast Martin // S. Afr. J. Geol. – 2001, № 4. – V. 104. – P. 319-342.
12. Налдретт, А.Дж. Сульфидные никелевые месторождения: Классификация, состав и генезис / А.Дж. Налдретт // Генезис рудных месторождений. – М.: Мир, 1984. – С. 253-343.
13. Налдретт, А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд / А.Дж. Налдретт. – СПб.: СПбГУ, 2003. – 487 с.
14. Шарков, Е.В. «Критический горизонт» Мончегорского плутона – дополнительная интрузивная фаза / Е.В. Шарков // Зап. ВМО. – 1982. – Т. 111, № 6. – С. 656-663.
15. Чернышов, Н.М. Новый тип сульфидного никелевого оруденения Воронежского кристаллического массива / Н.М. Чернышов // Геология рудных месторождений. – 1985. – № 3. – С. 34-45.
16. Чернышов, Н.М. Новый тип никеленосной формации в докембрии Воронежского кристаллического массива / Н.М. Чернышов, А.В. Переславцев, С.П. Молотков и др. // Изв. АН СССР. Сер. Геология. – 1991. – № 9. – С. 111-124.
17. Чернышов, Н.М. Минералогические особенности сульфидных никелевых руд Еланского месторождения / Н.М. Чернышов, В.В. Буковшин, Г.В. Спиридонов и др. // Минералогический журнал. – 1991. – Т. 13, № 1. – С. 18-31.
18. 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.
19. Чернышов, Н.М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н.М. Чернышов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. – 448 с.
20. Буковшин, В.В. Богатые эпигенетические медно-никелевые руды пегматоидного типа Еланского месторождения / В.В. Буковшин, С.П. Молотков, М.Н. Чернышова // Проблемы геодинамики и минерации Восточно-Европейской платформы: материалы междунар. конф. – Воронеж: ВГУ, 2003. – Т. 2. – С. 261-263.
21. Гриненко, Л.Н. Особенности формирования сульфидной никелевой минерализации в норит-диоритовых интрузиях ВКМ / Л.Н. Гриненко, Н.М. Чернышов // Геохимия. – 1988. – № 10. – С. 1421-1428.
22. Чернышова, М.Н. Дайки никеленосных комплексов Воронежского кристаллического массива (формационно-генетические типы и пространственно-временные соотношения) / М.Н. Чернышова // Вест. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 1996. – № 1. – С. 50-60.
23. Чернышова, М.Н. О генетической природе жильных норит-порфиритов еланского никеленосного комплекса / М.Н. Чернышова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 1997. – № 3. – С. 65-76.
24. Чернышова, М.Н. Особенности состава сульфидного медно-никелевого оруденения Центрального рудопоявления в связи с проблемой формационно-генетической принадлежности рудомещающих пироксенитов / М.Н. Чернышова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 1999. – № 7. – С. 120-127.
25. 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.
26. Чернышова, М.Н. Дайки никеленосных интрузий ВКМ и их соотношение с оруденением / М.Н. Чернышова // Проблемы геодинамики и минерации Восточно-Европейской платформы: материалы междунар. конф. 14-18 октября 2002 г. – Воронеж: ВГУ, 2002. – Т. 2. – С. 322-324.
27. Чернышова, М.Н. Дайки как важнейший структурно-вещественный элемент никель-платиноносных формаций и их соотношение с оруденением / М.Н. Чернышова // Современные проблемы формационного анализа, петрология и рудоносность магматических образований. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2003. – С. 373-374.
28. Чернышова, М.Н. Место и роль даек в формировании сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудомагматических систем различных геодинамических режимов (на примере ВКМ) / М.Н. Чернышова // Строение, геодинамика и минералогические процессы в литосфере: междунар. конф. – Сыктывкар, 2005. – С. 374-376.
29. Чернышова, М.Н. Дайки никель-платиноносных ультрамафит-мафитовых комплексов докембрия Центральной России и их соотношение с оруденением / М.Н. Чернышова // Ультрамафит-мафитовые комплексы складчатых областей докембрия: междунар. конф. 6-9 сентября 2005. – Улан-Удэ-Байкал.
30. Чернышов, Н.М. Уран-свинцовый возраст норит-диоритовых интрузий еланского никеленосного комплекса и их временные соотношения с габброноритами дифференцированных ультрамафит-мафитовых плутонов мамонского комплекса ВКМ / Н.М. Чернышов, Т.Б. Баянова, М.Н. Чернышова и др. // Геология и геофизика, 1998. – Т. 39, № 8. – С. 1064-1071.
31. Чернышов, Н.М. Уран-свинцовый возраст норит-диоритовых интрузий Еланского никеленосного комплекса Воронежского кристаллического массива / Н.М. Чернышов, Т.Б. Баянова, М.Н. Чернышова и др. // Докл. РАН. – 1998. – Т. 359, № 1. – С. 98-101.
32. Плаксенко, А.Н. Типоморфизм аксессуарных хромшпинелидов ультрамафит-мафитовых магматических формаций / А.Н. Плаксенко. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1989. – 224 с.
33. Blundy, J.D. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole – plagioclase geothermometer / J.D. Blundy, T.J.V. Holland // Contrib. Mineral. Petrol. – 1990. – V. 104, № 2. – P. 208-224.
34. Багдасарова, В.В. Интрузивные мафитовые породы раннего докембрия ВКМ: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / В.В. Багдасарова. – Киев, 1987. – 23 с.
35. Переславцев, А.В. Петрология норит-диоритовых интрузий докембрия Воронежского кристаллического массива в связи с проблемой их никеленосности: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / А.В. Переславцев. – Воронеж, 1993. – 23 с.
36. Чернышова, М.Н. Петрохимические группы диоритов никеленосных интрузий ВКМ / М.Н. Чернышова // Петрология и металлогения магматических и метаморфических комплексов КМА и смежных районов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1983. – С. 102-114.

37. Чернышова, М.Н. Особенности состава породных ассоциаций даек еланского никель-платиноносного комплекса ВКМ / М.Н. Чернышова // Петрография на рубеже XXI века: итоги и перспективы : 2-е Всерос. петрограф. совещ. – Сыктывкар : УРЦ РАН, 2000. – С. 242-243.
38. Chernyshov, N.M. The role assimilation in forming the nickeli-ferrous norite-diorite intrusions of the Voronezh crystalline massif / N.M. Chernyshov, A.V. Pereslavitsev // Int. Geol. Rev. – 1994. – V. 36. – P. 587-604.
39. Переславцев, А.В. Породообразующие минералы и петрогенезис никеленосных норит-диоритовых интрузий Воронежского кристаллического массива / А.В. Переславцев, А.А. Слюняев // Изв. РАН. Сер. Геология. – 1992. – № 11. – С. 81-98.
40. 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.
41. Кутолин, В.А. Петрологическая интерпретация петрохимических данных для вулканических пород / В.А. Кутолин, А.А. Прусевич // Геология и геофизика. – 1986. – № 7. – С. 99-104.
42. Чернышов, Н.М. Породообразующие минералы никеленосных интрузий ВКМ / Н.М. Чернышов, Г.Г. Дмитренко. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1979. – 248 с.
43. Roeder, P.L. Olivine-liquid equilibrium / P.L. Roeder, R.F. Emslie // Contrib. Mineral. Petrol. – 1970. – V. 29, № 4. – P. 275-289.
44. 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.
45. 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.
46. Hammarstrom, J.M. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer / J.M. Hammarstrom, Zen E-an. // Amer. Mineralogist. – 1986. – V. 71, № 11/12. – P. 1297-1313.
47. 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.
48. 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.
49. 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, R. Boyd, A. Korneliussen et al. // Proc. Symp. Geoplatinum. – London: Elsevier, 1988. – P. 113-143.
50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. Campbell, I.H. The difference between oceanic and continental tholeiites: a fluid dynamic explanation / I.H. Campbell // Contrib. Mineral. Petrol. – 1985. – V. 91, № 1. – P. 37-43.
54. Drake, M.J. Plagioclase – melt equilibria / M.J. Drake // Geochim. et cosmochim. acta. – 1976. – V. 40, № 4. – P. 457-465.
55. 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.
56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. Додин, Д.А. Платинометалльные месторождения России / Д.А. Додин, Н.М. Чернышов, Б.А. Яцкевич. – СПб. : Наука, 2000. – 755 с.
60. Слюняев, А.А. Элементы группы платины в никеленосных норит-диоритовых интрузиях докембрия Воронежского кристаллического массива / А.А. Слюняев, А.В. Переславцев, А.А. Исаичкин и др. // Геология рудных месторождений. – 1991. – № 6. – С. 57-73.
61. 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. Сер. Геология. – 1998. – № 5. – С. 120-151.