

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

Статья 1. Сульфидные никелевые руды еланского типа месторождений и особенности распределения в них металлов платиновой группы

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

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 28 февраля 2011 г.

Аннотация. Выявлены основные закономерности распределения металлов платиновой группы в рудах еланского типа месторождений. Установлены корреляционная взаимосвязь благородных металлов с главными рудообразующими компонентами (Ni, Cu, Co) и ведущая роль в их распределении арсенид-сульфоарсенидного парагенезиса.

Ключевые слова: месторождения, еланский тип, сульфидные платиноидно-медно-никелевые руды, минеральный и химический состав, элементы платиновой группы.

Abstract. The basic patterns of distribution of platinum group metals in ore deposits such as Elan are identified. The correlation between the noble metals and the main ore-forming components (Ni, Cu, Co), as well as the leading role of arsenide sulfoarsenide paragenesis in their distribution are established.

Key words: deposits, the Elan type, sulfide platinoide-copper-nickel ores, mineral and chemical composition, platinum group elements

Центральный регион России (в рамках Воронежского кристаллического массива – ВКМ) – крупный (600 × 1000 км) сегмент Восточно-Европейской платформы характеризуется высоким нераскрытым минерогеническим потенциалом природных и техногенных источников благородных металлов. На основе рудно-формационного анализа и установленной связи наиболее значительных концентраций элементов платиновой группы (ЭПГ) с определенными рудно-магматическими системами и стратифицированными метаморфическими комплексами и их метасоматитами в докембрийском фундаменте Центральной России выделено [1–5] двадцать формационно-генетических типов и подтипов платинометалльного и золото-платинометалльного оруденения (включая потенциально рудоносные комплексы.

При значительном многообразии формационно-генетических типов платинометалльного оруденения с разной степенью разведаны и изучены, по существу, лишь сульфидные платиноидно-медно-никелевых месторождения и проявления. Из шести выделенных в докембрийском фундаменте

типов сульфидных платиноидно-медно-никелевых рудно-магматических систем (РМС), связанных с различными геодинамическими режимами длительного (AR_1 - PR_1) становления литосферы ВКМ [1, 2, 5, 6], наиболее важными в промышленном отношении являются два: а) мамонский (Нижнемамонское, Подколodновское, Юбилейное месторождения и свыше 30 разномасштабных проявлений), ассоциирующий с дунит-перидотит-пироксенит-габброноритовой (возраст $2100\text{--}2080 \pm 14$ млн лет); б) еланский (Еланское, Ёлкинское месторождения и около 20 рудопроявлений), генетически связанный с многофазной субвулканической ортопироксенит-норит-диоритовой ($2065\text{--}2050 \pm 14$ млн лет) формациями рассеянного спрединга и реактивизированных структур Хопёрского мегаблока ВКМ (рис. 1).

1. Еланский тип сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд (условия локализации, типы и состав руд)

Из этих двух, в различной степени разведанных промышленно-генетических типов, целиком располагающихся в пределах Воронежской области, в качестве первоочередного объекта осво-

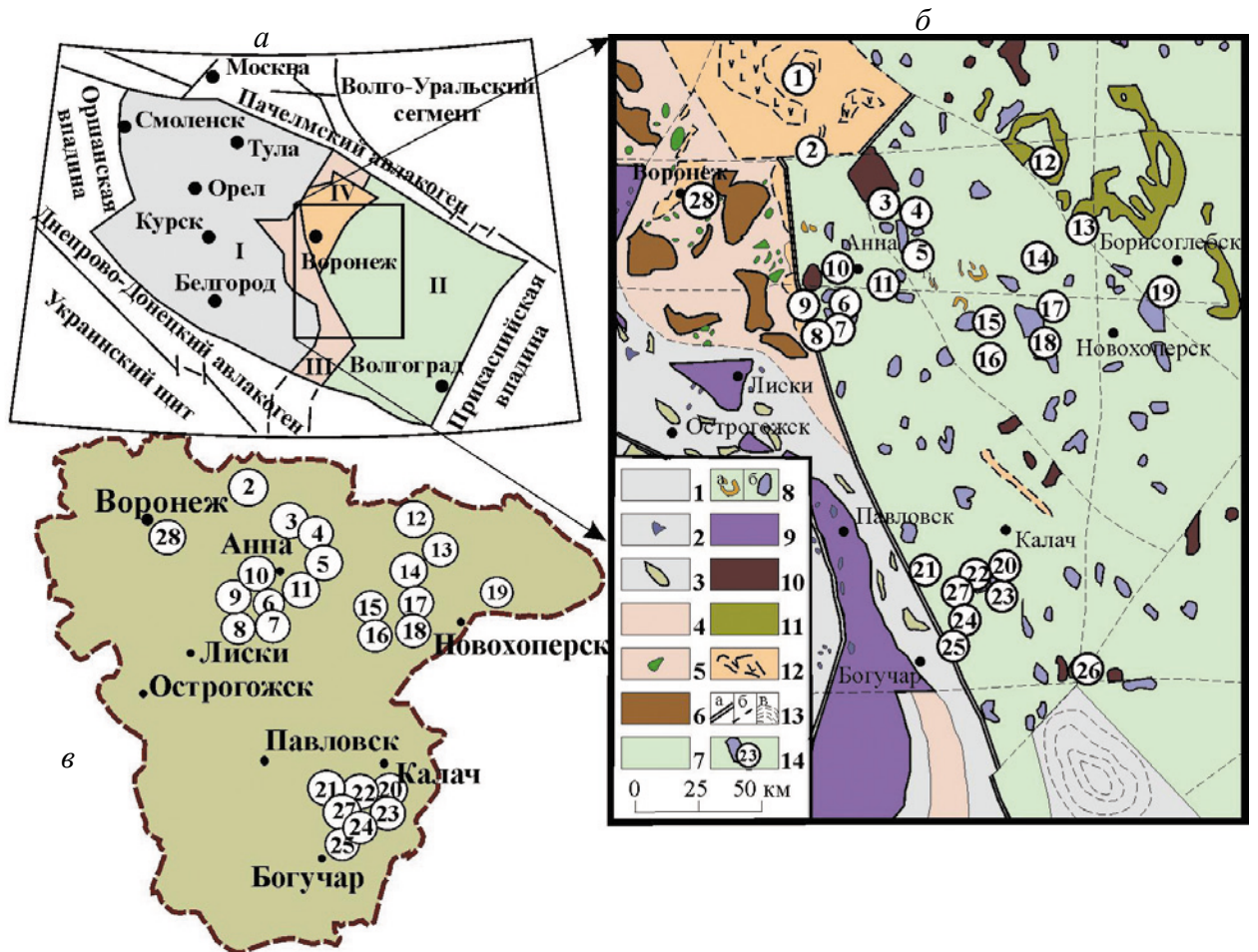


Рис. 1. Схема структурно-формационного районирования ВКМ (а) и размещение сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений и рудопроявлений мамонского и еланского типов на прогнозно-минерагенической карте платинометалльного и золото-платинометалльного оруденения докембрия Воронежского кристаллического массива в рамках Хоперского мегаблока (б) и Воронежской области (в): а: I – мегаблок КМА, II – Хоперский мегаблок, III – Лосевская шовная зона, IV – Ольховско-Шукавская грабенсинклиналь; б: 1 – (AR1ob) – обоянский гранулит-мигматит-гнейсовый комплекс; 2 – (AR2bg) – белогорьевский комплекс базит-гипербазитов; 3 – (AR2mh) – михайловская осадочно-вулканогенная (коматиит-базальтовая и базит-риодацитовая) серия; 4 – (AR-K1ls) – лосевская базальт-риолитовая серия; 5 – (K1r) – габброиды рождественского комплекса; 6 – (K1us) – усманский комплекс тоналит-плагриогранитов; 7 – (K1vc) – воронцовская углеродисто-терригенно-сланцевая серия; 8 – трахибазальтовая (K2rp – панинская толща), сиенитовая и щелочно-сиенитовая (K2ag – артюшковский комплекс) формации; (K1e, K1m) – еланский и мамонский комплексы базит-гипербазитов; 9 – (K1p) – мигматит-гранит-граносиениты павловского комплекса; 10 – субщелочные граниты бобровского комплекса; 11 – (K2n) – траппы новогольского комплекса; 12 – вулканогенно-осадочная формация (K1vr – воронежская свита); верлит-габбровая (K1sk – шукавский комплекс) и габбронорит-кварцмонзонит-гранитная формации (K1ol – ольховский комплекс); 13: а – региональные глубинные разломы, б – разрывные нарушения, в – купольные структуры; 14 – месторождения, рудопроявления и потенциально перспективные участки; в: 1 – Ольховский; 2 – Шукавский; 3 – Садовский; 4 – Восточно-Садовский; 5 – Моховской; 6 – Шишовский; 7 – Астаховский; 8 – Песковатский; 9 – Икорецкий; 10 – Рябиновско-Большемартыновский; 11 – Аннинский; 12 – Новогольский; 13 – Жердевский; 14 – Троицкий; 15 – Елань-Коленовский; 16 – Центральный; 17 – Еланский; 18 – Елкинский; 19 – Уваровский; 20 – Ширяевский; 21 – Мамонский; 22 – Артюховский; 23 – Бычковский; 24 – Юбилейный; 25 – Подколodновский; 26 – Пионерский (Липов Куст); 27 – Сухой Яр; 28 – Воронежский

ения представляют значительные по запасам и ресурсам высоконикелистые медисто-кобальтовые руды Еланского и Елкинского месторождений [1, 4, 6–14]

На **Еланском месторождении** выявлено две («Западная» и «Восточная») достаточно протяженные (от 400–600 до 1500 м) и сравнительно мощные зоны сульфидного платиноидно-медно-

кобальт-никелевого оруденения, которые приурочены преимущественно к центральной части вулканно-интрузивной колонны (рис. 2). Каждая из этих зон, характеризующихся сложной внутренней, крайне неравномерной, неупорядоченной перемежаемостью различных структурно-морфологических типов руд и в разной мере минерализованных норитов, включает ряд (от 6 до 8) кру-

топадающих (согласных с общей структурой вулканно-интрузивной колонны) прерывистых ленто- и линзообразных рудных тел. Значительная по протяженности (свыше 1000 м) и мощности (до 100 м) зона более бедного сульфидного вкрапленного оруденения вскрыта в южной (фланговой) части месторождения.

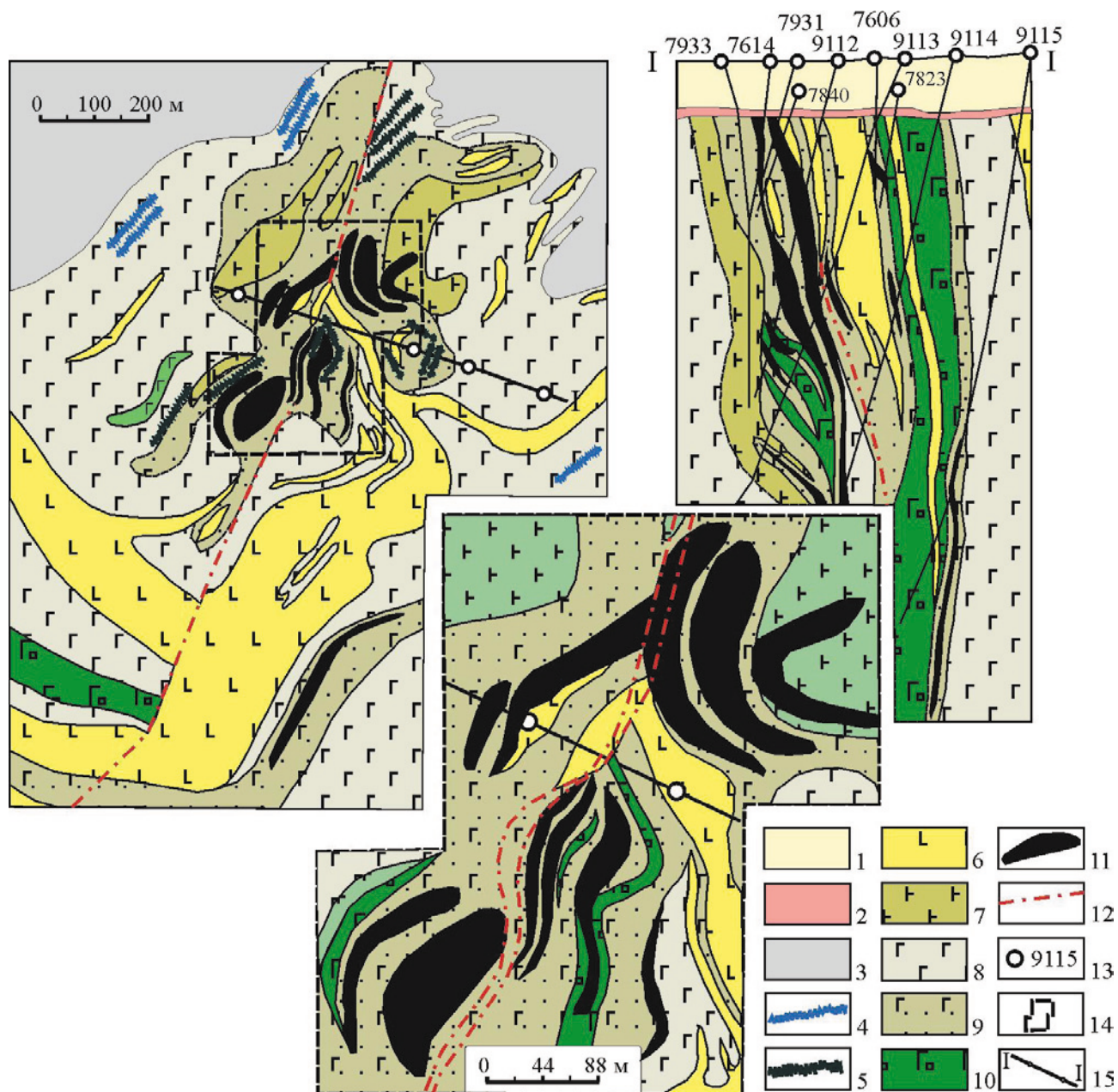


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Еланского месторождения: 1 – породы платформенного чехла (на разрезе); 2 – кора выветривания на кристаллическом фундаменте (на разрезе); 3 – песчаниково-сланцевые отложения воронцовской серии; 4 – дайки порфиритов, лампрофиров; 5 – диориты второй интрузивной фазы еланского комплекса; 6 – норит-порфириты жильные; 7 – нориты тонкозернистые (“фельзические”); 8–9 – нориты мелко-среднезернистые (8) и порфирировидные нориты (9); 10 – габбро-нориты оливиновые и безоливиновые мамонского комплекса; 11 – рудные тела; 12 – тектонические нарушения; 13 – скважины и их номера; 14 – контур врезки; 15 – линия геологического разреза

На **Елкинском месторождении** сульфидное платиноидно-медно-никелевое оруденение, установленное в северо-западной части кольцевого норит-диоритового тела, сконцентрировано в протяженной (свыше 1000 м) зоне, в которой крутопадающее линзовидное рудное тело мощностью от 2 до 42 м прослежено до глубины 1500 м (рис. 3).

Рудные зоны и тела месторождений, сложенные преимущественно вкрапленными с маломощными залежами массивных (от 0,2 до 1,5–2,5 м, иногда 3–5 м) и брекчиевидных (от 0,2 до 1,0 м) руд, обычно наследуют внутреннее строение вулкано-интрузивных норит-диоритовых массивов. Эти особенности, в целом присущие многочисленным рудопоявлениям, подтверждают представление [1, 2, 6, 9–11, 15] об определяющей роли в размещении оруденения прежде всего структурно-петрологических факторов, при этом разрыв-

ные нарушения лишь усложнили морфологию рудных зон вследствие перемещения их относительно друг друга.

Структурно-петрологические факторы отчетливо отражаются и в текстурно-структурных особенностях руд. Для сульфидных платиноидно-никелевых руд еланского типа характерно [6, 9–11] пространственное совмещение в пределах единых рудных тел и зон различных типов руд (тонковкрапленные, крупновкрапленные и оспенно-вкрапленные, гнездовые, шлировые, вкрапленно-прожилковые, брекчиевидные, массивные), структурно-морфологический облик которых наследует элементы крутопадающего (70–85°) залегания сульфидоносных норитовых тел. Количеством на Еланском и Елкинском месторождениях резко преобладают вкрапленные руды (более 85 %); прожилково-вкрапленные или вкрапленно-агрегатные и массивные имеют ограниченное

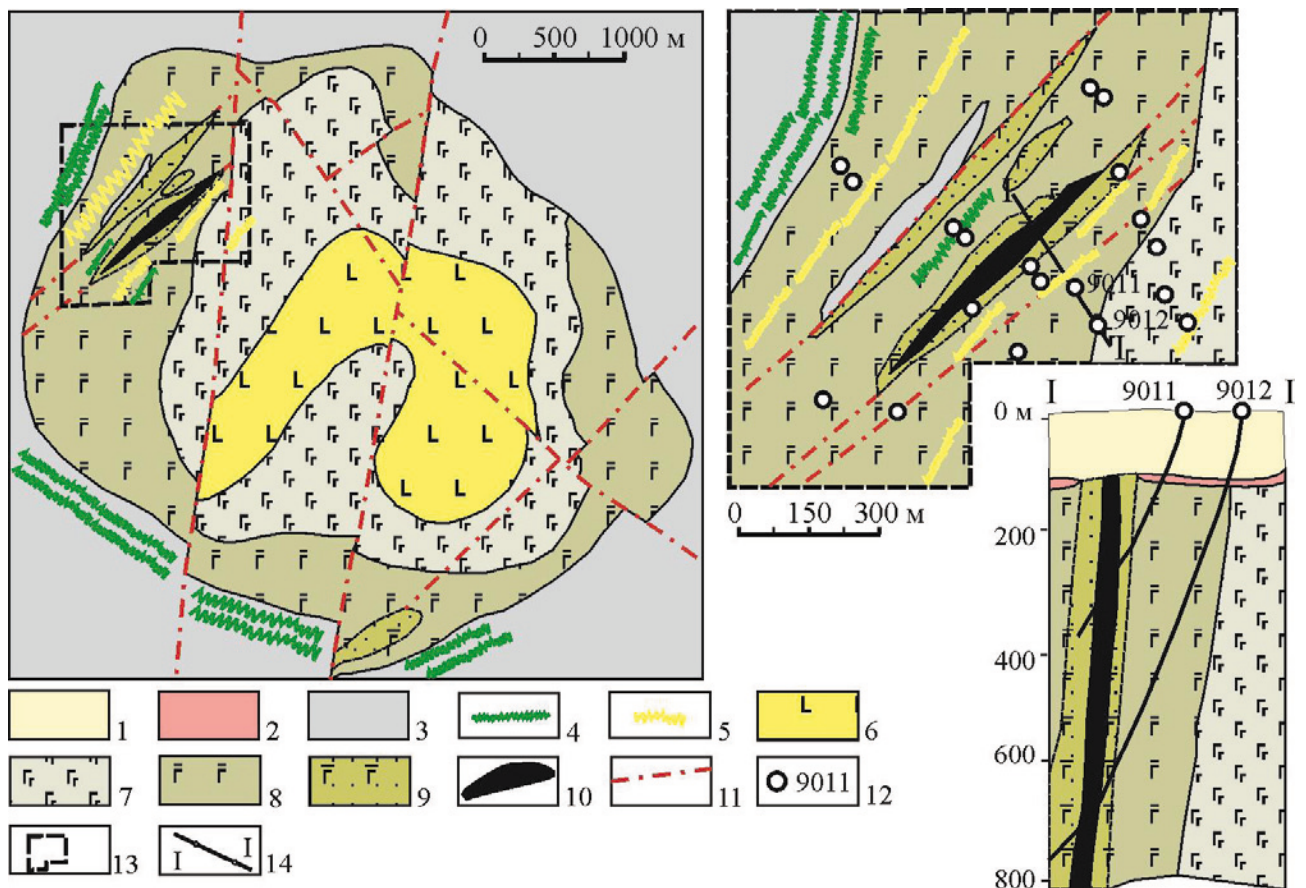


Рис. 3. Геологическая карта Елкинского месторождения: 1 – породы платформенного чехла (на разрезе); 2 – кора выветривания на кристаллическом фундаменте (на разрезе); 3 – песчаниково-сланцевые отложения воронцовской серии; 4 – дайки норит-порфиритов; 5 – дайки диоритов и диоритовых порфиритов; 6 – диориты;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

развитие (10–15 и 2–3 %, соответственно). При относительно невысокой доле (около 10–12 %) густовкрапленных, прожилково-вкрапленных и сплошных руд они, вместе с тем, концентрируют около половины полезных компонентов [6, 9, 10]. Кроме того, в маломощной коре выветривания рудных зон ограничено (1–2 %) развиты окисленные сульфидно-силикатные и силикатные разновидности руд.

По минеральному составу крапленные руды являются халькопирит (2–15 %) – пентландит (5–10 до 20–30 %, иногда более) – пирротиновыми (60–75 %) с ограниченным развитием (1–3 %) арсенидов и сульфоарсенидов Ni и Co, хромшпинелидов (2–3 %). Гнездово-прожилковые разновидности относятся преимущественно к пентландит (10–30 %, иногда до 50–60 %) – пирротиновым (65–80 %). В них почти вдвое уменьшается содержание халькопирита и двоекратно увеличивается роль никель-кобальтового арсенид-сульфо-арсенидного минерального парагенезиса, хромшпинелидов, отчасти молибденита, графита и золота. Эта особенность характерна и для массивных руд, которые представляют собой сплошной неравномернозернистый сульфидный (с широким развитием арсенидов и сульфоарсенидов) агрегат [9, 10].

При сравнительно небольшом (более 40) количестве минеральных видов и разновидностей руды еланского типа имеют специфический состав [6, 9, 10, 12, 13, 15, 16], значительно отличающий их от руд медно-никелевых месторождений мамонского и других типов прежде всего по характеру минеральных парагенезисов и соотношению главных рудных минералов. При ведущей количественной роли троилита, моноклинного и гексагонального *пирротина*, крайне ограниченном распространении (2,5 %, иногда до 10–15 % объема рудной массы) *халькопирита* руды еланского типа характеризуются высокими содержаниями (до 30–55 %) *пентландита*, постоянным присутствием (до 2–5 %) *хромшпинелидов*, ассоциирующих как с силикатами, так и сульфидами. Во всех разновидностях руд постоянно отмечаются *аргентопентландит*, *виоларит*, *валлериит*, *миллерит*, *кубанит*, *титаномагнетит*, иногда *ильменит*, *пирит*, *марказит*, *макиनावит*.

Особенностью руд еланского типа является тесное пространственно-временное совмещение раннего халькопирит-пентландит-пирротинового и более позднего существенно обогащенного платиноидами кобальт-никелевого арсенид-сульфо-арсенидного парагенезиса, сформировавшихся из

единого, обогащенного флюидами, рудоносного расплава [6, 9–14]. Относительно широко распространенные (до 2–5 %, иногда до 7 %) арсениды, сульфоарсениды и антимониды никеля и кобальта, а также висмутиды и теллуриды представлены тесным срастанием достаточно большого числа минеральных фаз [6, 9–13], среди которых количественно преобладают *никелин* и минералы ряда *герсдорфит* - *кобальтин*, широкий изоморфизм между Ni, Co и отчасти Fe в катионной части которых обуславливает значительные вариации химического состава *герсдорфита*, *кобальтистого герсдорфита*, *никелистого кобальтина* и *кобальтина*. Более ограниченно развиты: *кобальто-никелевый леллингит*, *маухерит*, *минерал состава Ni₃As₂*, *гаухекорнит двух разновидностей*: а) *собственно гаухекорнит*; б) *сурмяная разновидность* – *стибиогаухекорнит*; *ульманит*, *теллуrowисмутит*, *брейтгауптит*, *арсенопирит*, *скуттеродит*, *данаит*, *смальтин*, *раммельсбергит*. Входящие в арсенид-сульфоарсенидный парагенез другие редкие минералы представлены *молибденитом*, *сфалеритом*, *галенитом*, *борнитом*, *маккиनावитом*, *тунгстенином*, *самородным золотом*; в этой ассоциации присутствуют кюстелит и алтаит. В виоларитизированных и окисленных разновидностях руд существенные концентрации никеля и кобальта отмечаются в пирите и марказите.

Специфические особенности минерального парагенезиса руд еланского типа отчетливо прослеживаются в их химическом составе. По содержанию главных рудообразующих элементов (Ni, Co, Si) руды еланского типа принадлежат [2, 6, 9–11, 14, 16] к маломедистым высоконикелистым с повышенными концентрациями кобальта (табл. 1), значительно обогащены изотопно-легкой серой ($\delta^{34}\text{S} = -0,3 - -11,6 \%$), отличаются широким комплексом попутных полезных (Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Os, Ir, Ru, Se, Te, Mo) и вредных (As, Sb, Bi, Pb) компонентов. Эти общие для всех месторождений и рудопроявлений признаки сульфидного никелевого оруденения выступают в качестве одного из определяющих элементов рудномагматической системы еланского типа [1, 3, 6, 9 и др.]. На бинарных диаграммах (Ni/Cu) и Cu/(Cu+Ni)-Pt/(Pt+Pd) руды еланского типа образуют самостоятельные поля (рис. 4), совпадающие с полями составов руд архейских коматиит-ассоциированных сульфидных никелевых месторождений. С рудномагматической системой этого типа их в известной мере сближает постоянное присутствие высокохромистых цинксодержащих ($0,2 < \text{ZnO} < 3 \%$) хромшпинелидов.

Таблица 1

Содержание рудообразующих элементов (мас. %) и величины их отношений в сульфидных никелевых рудах еланского типа (по [6, 9, 13])

| Типы руд | S | Ni | Co | Cu | S/Ni | Ni/Cu | Ni/Co | S / Ni+Co+Cu | В 100% сульфидов | | | |
|---|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|------------------|-------|------|------|
| | | | | | | | | | Fe | Ni | Co | Cu |
| <i>Еланское месторождение</i> | | | | | | | | | | | | |
| 1(42) | <u>4,02</u> 3,78 | <u>1,31</u> 0,97 | <u>0,04</u> 0,04 | <u>0,14</u> 0,18 | <u>3,07</u> 3,05 | <u>9,36</u> 78,70 | <u>32,93</u> 133,5 | 2,7 | 47,92 | 12,36 | 0,38 | 1,32 |
| 2(17) | <u>12,87</u> 6,65 | <u>5,48</u> 3,40 | <u>0,25</u> 0,27 | <u>0,19</u> 0,18 | <u>2,35</u> 4,58 | <u>28,84</u> 310,9 | <u>23,92</u> 490,5 | 2,2 | 44,42 | 16,18 | 0,74 | 0,56 |
| 3(11) | <u>24,82</u> 2,98 | <u>8,01</u> 7,32 | <u>0,19</u> 0,24 | <u>0,07</u> 0,08 | <u>3,10</u> 4,13 | <u>114,4</u> 562,4 | <u>42,16</u> 1169,4 | 3,0 | 49,34 | 12,26 | 0,29 | 0,11 |
| <i>Елкинское месторождение</i> | | | | | | | | | | | | |
| 4(17) | <u>4,37</u> 5,52 | <u>0,41</u> 0,42 | <u>0,02</u> 0,03 | <u>0,06</u> 0,06 | <u>10,66</u> 9,25 | <u>6,89</u> 222,3 | <u>20,50</u> 14,37 | 8,9 | 57,74 | 3,57 | 0,17 | 0,52 |
| 5(5) | <u>21,49</u> 2,74 | <u>1,35</u> 0,31 | <u>0,11</u> 0,05 | <u>0,33</u> 0,16 | <u>15,92</u> 3,23 | <u>4,09</u> 3,86 | <u>12,27</u> 25,54 | 12,0 | 58,84 | 2,39 | 0,19 | 0,58 |
| 6(4) | <u>24,39</u> 1,81 | <u>2,56</u> 1,40 | <u>0,09</u> 0,05 | <u>0,07</u> 0,05 | <u>9,53</u> 4,60 | <u>36,57</u> 816,2 | <u>28,44</u> 2550,6 | 9,0 | 57,76 | 3,99 | 0,14 | 0,11 |
| <i>Руды в дайках: а) ортопироксенитов (Центральное рудопроявление)</i> | | | | | | | | | | | | |
| 7(14) | 6,19 | 0,78 | 0,05 | 0,17 | 7,94 | 4,59 | 15,60 | 6,20 | 56,53 | 4,79 | 0,31 | 0,37 |
| 8(4) | 15,47 | 1,70 | 0,15 | 0,25 | 9,10 | 6,80 | 11,33 | 7,40 | 56,86 | 4,17 | 0,36 | 0,61 |
| <i>б) роговообманкового габбро (в пределах Еланского месторождения)</i> | | | | | | | | | | | | |
| 9(3) | 3,75 | 0,48 | 0,02 | 0,07 | 3,10 | 7,91 | 24,95 | 8,48 | 56,34 | 4,80 | 0,19 | 0,67 |
| 10(12) | 10,77 | 3,42 | 0,05 | 0,29 | 3,01 | 12,01 | 65,81 | 2,86 | 48,80 | 12,07 | 0,18 | 1,01 |
| 11(1) | 14,85 | 6,25 | 0,10 | 0,87 | 2,38 | 7,18 | 62,50 | 2,06 | 43,52 | 15,99 | 0,26 | 2,23 |

Примечание. 1, 4 – вкрапленные; 2, 5 – гнездово-прожилковые; 3, 6 – массивные руды Еланского и Елкинско-го месторождений; 7, 9 – вкрапленные; 8, 10 – гнездово-шпировые (8), прожилково-вкрапленные и гнездовые (10); 11 – массивные руды в дайках ортопироксенитов (Центральное рудопроявление) и роговообманковом габбро в пределах Еланского месторождения. В скобках количество анализов; в числителе – среднее, в знаменателе – стандартное отклонение (для руд Еланского и Елкинского месторождений). Расчет состава сульфидной фазы произведен при S = 38 % по средним содержаниям.

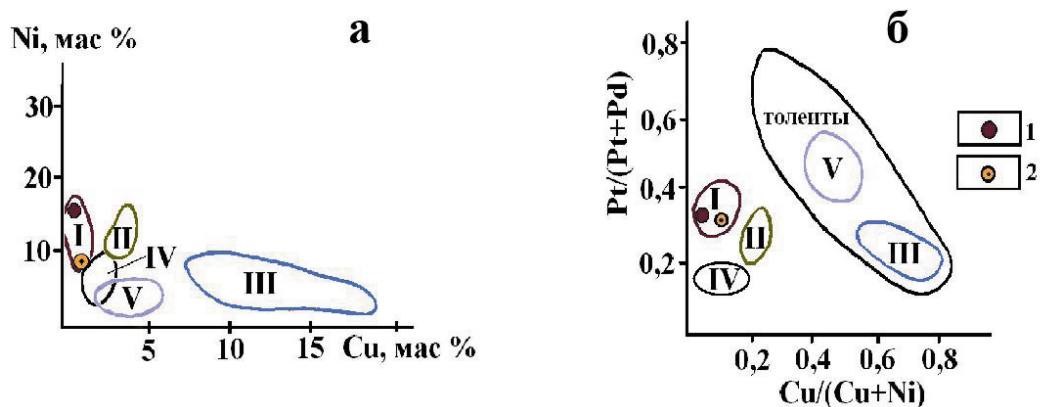


Рис. 4. Сравнительные характеристики: а – распределения Ni-Cu; б – диаграмма Pt/(Pt+Pd)-Cu/(Cu+Ni) отношения (содержания металлов пересчитаны на 100 % сульфидов) в рудах различных типов месторождений (I–V – месторождения, связанные с архейскими (I) и протерозойскими (II) коматитами, платобазальтами (III), габброидами (IV), и месторождение Садбери (V) (по [17]); Еланского месторождения (1 – средний состав массивных руд; 2 – то же для вкрапленных руд (по [2, 6, 9, 10, 19])

Наиболее высокими концентрациями никеля характеризуются массивные, густовкрапленные и прожилково-вкрапленные руды Еланского месторождения. Руды Елkinsкого месторождения и других проявлений – высокосернистые и высокожелезистые и отличаются более высокими, присутствующими малоэродированным рудным телам концентрациями попутных компонентов (см. табл. 2). В их 100%-ном сульфидном концентрате содержание никеля и кобальта в 2–5 раз ниже по сравнению с рудами Еланского месторождения [6, 9].

Основной формой нахождения никеля в рудах является сульфидная (более 90 % от общего количества никеля), и лишь в коре выветривания значительно (до 50 % и более) возрастает доля силикатного никеля. Главный носитель никеля – пентландит, на долю которого приходится 93–94 % сульфидного никеля; меньшая часть приходится на виоларит – 3–4 %, пирротин – 2–3 %, арсениды и сульфоарсениды – 1–2 %. Вся медь находится в сульфидной форме и в одном минерале – халькопирите. Около 90 % кобальта содержится в рудных минералах и примерно 10 % – в силикатах. Основной минерал-носитель кобальта – пентландит, на долю которого приходится 65–75 % от общего его количества. Значительная часть кобальта концентрируется в сульфоарсенидах – 12–17 %, небольшая доля содержится в

виоларите – 3–4 %, в пирротине, пирите и марказите – 1–2 %.

2. Особенности распределения ЭПГ в сульфидных никелевых рудах еланского типа

Важнейшими компонентами руд, существенно повышающими рентабельность производства при освоении месторождений, являются благородные металлы (ЭПГ, Au, Ag). При значительных содержаниях никеля и кобальта руды еланского типа характеризуются в целом близкими к богатым рудам печенгского типа количествами Pt и Pd, на долю которых приходится около 95 % от суммы платиноидов; Rh, Ru и Ir находятся примерно в равных количествах, но их содержание почти на порядок ниже концентраций платины и палладия (табл. 2). Полученные на значительном объеме проб в различных лабораториях и организациях средневзвешенные содержания ЭПГ и сопутствующих им элементов в рудах Еланского месторождения (табл. 3), свидетельствуют в целом о невысоких величинах средних значений концентраций платиноидов (0,31–0,48 г/т), золота (0,11–0,85 г/т) и серебра (2,9–4,7 г/т), а также Se (7,5–21,7 г/т), Te (1,7–4,4 г/т). Эти значения отражают содержания благородных металлов и по всей мощности ряда вскрытых рудоносных зон Еланского месторождения (табл. 4).

Таблица 2

Средние содержания рудообразующих (в мас.%) и благородных (в г/т) металлов в сульфидных платиноидно-кобальт-медно-никелевых рудах еланского типа

| Элементы | 1(12) | 2(10) | 3(5) | 4(5) | 5(4) | 6(41) | 7(2) | 8(14) | 9(4) | 10(2) | 11(1) | 12(2) |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ni | 1,45 | 8,34 | 0,87 | 7,87 | 10,64 | 1,70 | 0,29 | 0,78 | 1,70 | 3,44 | 9,35 | 7,65 |
| Cu | 0,11 | 0,47 | 0,11 | 0,25 | 0,23 | 0,20 | 0,17 | 0,17 | 0,25 | 0,30 | 1,140 | 0,925 |
| Co | 0,42 | 0,20 | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | 0,05 | 0,15 | 0,05 | 0,342 | 0,296 |
| S | 4,67 | 21,08 | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | 6,19 | 15,47 | Н.о | Н.о | Н.о |
| Ir | – | 0,020 | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | 0,015 | Н.о | Н.о |
| Ru | 0,012 | 0,011 | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | 0,005 | Н.о | Н.о |
| Rh | 0,003 | 0,008 | 0,003 | 0,002 | – | Н.о | 0,002 | Н.о | Н.о | 0,008 | Н.о | Н.о |
| Pt | 0,034 | 0,147 | 0,073 | 0,170 | 0,046 | 0,058 | 0,020 | 0,019 | 0,031 | 0,13 | 0,42 | 0,37 |
| Pd | 0,053 | 0,348 | 0,072 | 0,360 | 0,160 | 0,098 | 0,032 | 0,031 | 0,075 | 0,38 | 1,14 | 0,88 |
| Сумма ЭПГ | 0,102 | 0,534 | 0,148 | 0,632 | 0,206 | 0,156 | 0,054 | 0,050 | 0,106 | 0,528 | 1,56 | 1,25 |
| Au | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | Н.о | 0,130 | 0,460 | Н.о | Н.о | Н.о | 1,03 | 0,91 |
| Pd/Pt | 1,7 | 2,4 | 1,0 | 2,1 | 3,5 | 1,7 | 1,6 | 1,6 | 2,45 | 2,9 | 2,7 | 2,4 |

Примечание: Еланское месторождение: 1–2 – вкрапленные и массивные руды; 3 – вкрапленные руды в норитах; 4 – брекчиевидные и вкрапленно-прожилковые (“пятнистые”) руды; 5 – массивные (жильные) руды; 6 – руды восточной рудоносной зоны; 7 – вкрапленные руды Центрального рудопроявления; 8 – густовкрапленные и 9 – гнездово-шиповые руды в ортопироксенитах Центрального рудопроявления (по [13]); 10 – гнездово-прожилковые руды в жильных (дайковых) роговообманковых габбро Еланского месторождения; 11–12 – жильные сульфидно-пегматоидные руды Еланского месторождения. Анализы выполнены в лаборатории ОЭИ ЦНИГРИ (г. Тула, № 3–5, 7), Гипроникель, все другие в ИГЕМ РАН. В скобках – количество анализов; н.о – элемент не определялся; “–” – содержание элемента ниже чувствительности анализа.

Таблица 3

Средневзвешенные содержания ЭПГ, Au, Ag, Se и Te в рудах Еланского месторождения

| Организация, проводившая исследования | Объем опробованного керна, м | Содержание, г/т | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------|------|-----|------|-----|
| | | ЭПГ | Au | Ag | Se | Te |
| ЦНИГРИ | 688.2 | 0.36 | 0.36 | 4.6 | 12.2 | 1.7 |
| Гипроникель | 1426 | 0.31 | 0.11 | 2.9 | 7.5 | 1.9 |
| Южно-Воронежская ГРП | 146.3 | 0.48 | 0.85 | 4.7 | 21.7 | 4.4 |
| Среднее | 2200.5 | 0.33 | 0.20 | 3.3 | 9.2 | 1.8 |

Таблица 4

Химический состав медно-никелевых руд Еланского месторождения и распределение в них ЭПГ, Au и сопутствующих элементов (по всей мощности вскрытых рудоносных зон)

| № п/п | № скв. | Интервал опробования, (м) | Компоненты (мас.%) | | | | | | Содержание элементов (г/т) | | | | | | | |
|----------------------|--------|---------------------------|--------------------|------|-------|-------|-------|------|----------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|--|
| | | | Ni | Cu | Co | S | As | Pt | Pd | Rh | Ir | Ru | Au | Ag | Se | |
| 1 | 7687 | 255.0-273.0 | 1.23 | 0.15 | 0.036 | 1.50 | 0.020 | 0.14 | 0.13 | 0.016 | н.о. | 0.14 | 0.20 | 2.80 | 8.0 | |
| 2 | 7687 | 331.0-354.0 | 0.63 | 0.06 | 0.020 | 1.93 | 0.019 | 0.10 | 0.12 | 0.012 | н.о. | 0.013 | 0.06 | 1.80 | 10.0 | |
| 3 | 7819 | 272.0-461.7 | 1.08 | 0.14 | 0.022 | 1.93 | 0.035 | 0.19 | 0.13 | 0.018 | 0.028 | 0.019 | 0.14 | 3.65 | 8.0 | |
| 4 | 7927 | 267.0-350.5 | 0.54 | 0.09 | 0.027 | 3.52 | 0.020 | 0.07 | 0.08 | 0.013 | 0.01 | 0.013 | 0.06 | 1.90 | 6.0 | |
| 5 | 7928 | 266.0-345.2 | 0.90 | 0.15 | 0.035 | 2.80 | 0.038 | 0.17 | 0.15 | 0.018 | н.о. | 0.014 | 0.17 | 3.40 | 9.0 | |
| 6 | 7928 | 376.2-412.0 | 0.69 | 0.08 | 0.021 | 2.08 | 0.028 | 0.10 | 0.10 | 0.019 | н.о. | 0.020 | 0.10 | 1.70 | 7.0 | |
| 7 | 7928 | 412.0-446.0 | 1.18 | 0.11 | 0.032 | 3.50 | 0.049 | 0.11 | 0.12 | 0.020 | н.о. | 0.025 | 0.13 | 2.40 | 7.0 | |
| 8 | 7931 | 302.0-345.0 | 1.40 | 0.11 | 0.036 | 3.20 | 0.061 | 0.13 | 0.09 | 0.018 | 0.012 | 0.011 | 0.08 | 2.90 | 6.0 | |
| 9 | 7931 | 496.0-525.5 | 0.69 | 0.05 | 0.018 | 1.72 | 0.027 | 0.17 | 0.19 | 0.030 | н.о. | 0.020 | 0.09 | 1.40 | 9.0 | |
| 10 | 8100 | 937.0-968.0 | 0.57 | 0.05 | 0.011 | 1.12 | 0.050 | 0.11 | 0.12 | 0.021 | н.о. | 0.018 | 0.12 | 2.70 | 5.0 | |
| 11 | 8100 | 1044.0-1157.0 | 0.87 | 0.12 | 0.017 | 1.97 | 0.033 | 0.20 | 0.16 | 0.018 | н.о. | 0.017 | 0.17 | 3.70 | 6.0 | |
| 12 | 8100 | 1157.9-1225.0 | 1.05 | 0.12 | 0.025 | 2.97 | 0.019 | 0.08 | 0.08 | 0.012 | н.о. | 0.014 | 0.06 | 2.50 | 10.0 | |
| 13 | 8413 | 309.0-413.7 | 1.79 | 0.13 | 0.041 | 3.11 | 0.038 | 0.15 | 0.15 | 0.012 | 0.011 | 0.012 | 0.11 | 5.20 | 10.0 | |
| 14 | 8413 | 524.0-655.3 | 1.52 | 0.12 | 0.059 | 9.16 | 0.034 | 0.06 | 0.10 | 0.011 | н.о. | 0.014 | 0.03 | 2.20 | 10.0 | |
| 15 | 8413 | 662.0-756.8 | 1.40 | 0.08 | 0.070 | 13.16 | 0.026 | 0.06 | 0.08 | 0.012 | н.о. | 0.002 | 0.02 | 2.25 | 6.0 | |
| 16 | 8472 | 257.0-304.5 | 0.66 | 0.11 | 0.018 | 7.84 | 0.023 | 0.13 | 0.15 | 0.021 | н.о. | 0.023 | 0.12 | 1.25 | 5.0 | |
| 17 | 8501 | 255.7-286.8 | 2.30 | 0.20 | 0.109 | 9.47 | 0.017 | 0.13 | 0.15 | 0.030 | 0.027 | 0.040 | 0.10 | 1.80 | 5.0 | |
| 18 | 8501 | 388.5-423.7 | 3.35 | 0.38 | 0.094 | 8.09 | 0.048 | 0.26 | 0.28 | 0.030 | 0.018 | 0.040 | 0.20 | 5.20 | 9.0 | |
| 19 | 8501 | 425.7-468.0 | 1.39 | 0.16 | 0.015 | 3.49 | 0.017 | 0.19 | 0.18 | 0.020 | 0.021 | 0.020 | 0.13 | 2.85 | 6.0 | |
| 20 | 8501 | 468.0-504.0 | 3.94 | 0.40 | 0.093 | 9.87 | 0.037 | 0.23 | 0.27 | 0.022 | н.о. | 0.040 | 0.24 | 4.40 | 10.0 | |
| 21 | 8503 | 567.0-614.0 | 0.59 | 0.08 | 0.014 | 0.86 | 0.033 | 0.14 | 0.11 | 0.020 | н.о. | 0.021 | 0.12 | 2.30 | 5.0 | |
| 22 | 8502 | 1071.9-1094.8 | 0.95 | 0.06 | 0.039 | 7.85 | 0.020 | 0.07 | 0.10 | 0.019 | н.о. | 0.017 | 0.05 | 1.90 | 5.0 | |
| Среднее по 22 пробам | | | 1.30 | 0.13 | 0.038 | 4.60 | 0.031 | 0.13 | 0.14 | 0.018 | 0.018 | 0.025 | 0.11 | 2.74 | 7.36 | |

Примечание: опробованные интервалы включали все типы и разновидности руд; н.о. – элемент не определялся. Количество теллура во всех пробах менее 2 г/т. Содержание осмия не определялось. Анализы выполнены в институте “Гипроникель” (СПб.).

В количественно преобладающих в месторождениях и рудопроявлениях вкрапленных рудах в норитах и ортопироксенитах ЭПГ содержатся в незначительных количествах (0,065–0,145 г/т) и распределены крайне неравномерно. Наиболее низкие их содержания присущи бедным (Ni + Cu + Co < 0,25 %) вкрапленным рудам с преобладанием пирротина. В халькопирит-пентландит-пирротиновых рудах рудоносных зон с невысокой долей (до 1–1,5 %) в минеральном парагенезисе сульфидов никеля и кобальта заметно возрастают концентрации платины (0,170 г/т), палладия (0,15 г/т), родия (0,020 г/т); величина Pd/Pt отношения за небольшим исключением > 1 (см. табл. 2, табл. 4).

Повышенными концентрациями ЭПГ характеризуются брекчиевидные и более медистые вкрапленно-прожилковые руды (Ni – 6,66 %, Cu – 0,23 %, Pt – 0,68 г/т, Pd – 1,3 г/т); среднее содержание палладия и платины (по 5 анализам) составляет 0,530 г/т (Pd/Pt = 2,1). В массивных рудах высокие концентрации платиноидов выявлены в наиболее богатых рудах (Ni – 13,3–14,35 %, Cu – 0,28–1,17 %, Co – 0,25–0,30 %, Pt – 0,10–0,38 г/т,

Pd – 0,36–1,0 г/т, Rh – до 0,03 г/т, Ru – до 0,012 г/т, Ir – до 0,014 г/т) при среднем содержании платиноидов 0,495 г/т (Pd/Pt = 2,4). В единичных пробах массивных руд установлено до 12 г/т ЭПГ и до 2,5 г/т Au, а также наличие в зернах пентландита и пирротина мелких изометричных кристаллов, которые по ряду физических параметров близки к природному сплаву Pt и Fe [10]. В брекчиевидных и массивных рудах палладий заметно преобладает над платиной (Pd/Pt > 2). Последнее является не только следствием высоких содержаний сульфидов никеля, меди, кобальта, но и отражает существенное возрастание в них арсенидов и сульфидов, наиболее характерных для поздних пневматолитовых по своей природе стадий единого рудообразующего процесса и сопровождающихся накоплением в своем составе повышенных концентраций осмия, иридия, рутения, платины и палладия (см. табл. 4). В подобных рудах заметно обогащается палладием пирротин. Микророндовые анализы выявили в пирротине наличие родия (200 г/т), платины (100 г/т) и золота (200 г/т), а в пентландите – присутствие (частота встречаемости – 44 %) палладия (табл. 5).

Таблица 5

Состав родий-палладийсодержащих пирротинов и палладийсодержащих пентландитов медно-никелевых руд Еланского месторождения

| 1. Родий-палладийсодержащие пирротины | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|-------|---------|
| № обр. | Компоненты (мас. %) | | | | | | | | | | | |
| | Fe | Ni | Co | Cu | Rh | Pd | Au | Pt | S | As | Sb | Σ |
| Е-15-3 | 59.700 | 0.410 | 0.090 | – | 0.020 | – | – | – | 39.030 | н.о. | 0.070 | 99.320 |
| Е-8-4 | 59.930 | 3.110 | 0.420 | – | н.о. | – | 0.020 | н.о. | 39.080 | 0.070 | н.о. | 99.630 |
| Е-13-4 | 60.340 | 0.310 | 0.060 | – | н.о. | 0.010 | н.о. | н.о. | 39.870 | 0.130 | н.о. | 100.720 |
| 2. Палладийсодержащие пентландиты | | | | | | | | | | | | |
| № обр. | Компоненты (мас. %) | | | | | | | | | | | |
| | Fe | Ni | Co | Cu | Rh | Pd | Au | Pt | S | As | Sb | Σ |
| Е-15-4 | 28.160 | 35.640 | 2.900 | – | – | – | – | – | 33.330 | – | 0.040 | 100.070 |
| Е-7-2а | 28.286 | 38.780 | 0.210 | 0.020 | н.о. | 0.010 | н.о. | н.о. | 33.020 | – | н.о. | 100.300 |
| Е-10-3 | 27.060 | 39.030 | 0.780 | 0.010 | н.о. | 0.010 | н.о. | н.о. | 33.380 | – | н.о. | 100.270 |
| Е-9-3 | 26.890 | 39.880 | 0.370 | – | н.о. | 0.030 | н.о. | н.о. | 33.280 | – | н.о. | 100.450 |
| Е-11-5 | 28.410 | 37.690 | 0.540 | – | н.о. | 0.020 | н.о. | н.о. | 33.000 | – | н.о. | 99.660 |
| Е-11 | 28.830 | 38.120 | 0.500 | 0.020 | н.о. | 0.010 | н.о. | н.о. | 33.560 | – | н.о. | 101.040 |
| Е-12 | 29.270 | 36.870 | 0.990 | – | н.о. | 0.010 | н.о. | н.о. | 33.480 | – | н.о. | 100.620 |
| Е-13-3 | 29.400 | 36.700 | 0.470 | 0.040 | н.о. | 0.010 | н.о. | н.о. | 33.680 | – | н.о. | 100.300 |

Примечание: здесь и далее: прочерк – элемент не обнаружен; н.о. – элемент не определялся. Анализы выполнены в ИГЕМ РАН на микроанализаторе MS-46 “Самеса”. Аналитик И.П. Лапутина.

Закономерности фракционирования платиновых металлов в сульфидных рудах, как известно [18], определяются как собственно магматическими процессами, так и влиянием регионально-метаморфических преобразований. Для оценки возможности ремобилизации руд при региональном метаморфизме использована трехкомпонентная диаграмма Fe-(Ni+Co)-S (рис. 5, а), на которой подавляющее большинство фигуративных точек составов руд Еланского месторождения попадает в поле-I моносульфидного твердого раствора “MSS”, что характерно для неметаморфизованных собственно магматических месторождений. Напротив, руды, мо-

билизированные при участии процессов метаморфизма, на данной диаграмме выпадают из контура “MSS”, образуя отдельное самостоятельное поле (см. рис. 5, а; поле-II).

Собственно магматическая природа руд еланского типа позволяет использовать корреляционный анализ для установления взаимозависимостей между цветными и благородными металлами в целях определения возможных форм концентрирования ЭПГ. Матрица парных коэффициентов корреляции представлена в таблице 6. Анализ корреляционных зависимостей позволяет среди ЭПГ выделить две группы элементов: Pd, Pt, Rh с одной стороны, и Ru – с другой.

Таблица 6

Значения парных коэффициентов корреляции в рудах Еланского месторождения

| элемент | Ni | Cu | Co | S | As | Ru | Rh | Pt | Pd | Pb | Zn |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Cu | <u>0,77</u> | | | | | | | | | | |
| Co | <u>0,97</u> | <u>0,75</u> | | | | | | | | | |
| S | <u>0,88</u> | <u>0,71</u> | <u>0,90</u> | | | | | | | | |
| As | <u>0,76</u> | <u>0,64</u> | <u>0,79</u> | 0,60 | | | | | | | |
| Ru | 0,08 | 0,00 | 0,13 | 0,11 | -0,09 | | | | | | |
| Rh | <u>0,63</u> | 0,27 | <u>0,63</u> | <u>0,42</u> | <u>0,55</u> | 0,18 | | | | | |
| Pt | <u>0,76</u> | <u>0,55</u> | <u>0,74</u> | <u>0,58</u> | <u>0,69</u> | 0,00 | <u>0,83</u> | | | | |
| Pd | <u>0,83</u> | <u>0,52</u> | <u>0,77</u> | <u>0,71</u> | <u>0,56</u> | 0,06 | <u>0,51</u> | <u>0,80</u> | | | |
| Pb | <u>0,54</u> | <u>0,59</u> | <u>0,56</u> | 0,21 | <u>0,82</u> | -0,05 | <u>0,45</u> | <u>0,61</u> | <u>0,41</u> | | |
| Zn | <u>0,70</u> | <u>0,70</u> | <u>0,69</u> | <u>0,68</u> | <u>0,48</u> | -0,12 | 0,25 | <u>0,65</u> | <u>0,74</u> | <u>0,41</u> | |
| Cr | -0,65 | -0,54 | -0,67 | -0,71 | -0,50 | 0,40 | -0,40 | -0,51 | -0,51 | -0,29 | -0,45 |

Примечание: подчеркнуты значимые величины коэффициентов при доверительном интервале 0,05 по [19].

Анализ корреляционных зависимостей выявляет [6, 9, 19] тесную и наиболее сильную связь Pt + Pd + Rh как между собой, так и всей триады с Ni, Cu, Co, S, и особенно с As (см. рис. 5, в, д, е), что вообще характерно для многих магматогенных по своей природе сульфидных медно-никелевых месторождений [6, 17, 22 и др.]. Распределение рутения определяется связью как с халькофильными элементами, так и в большей мере с Cr и его вероятной ассоциацией с хромшпинелидами с образованием возможно собственных минеральных фаз типа лаурита – RuS₂ [24, 25], присутствующего в хромитах многих платиноносных расслоенных комплексов [1, 17, 22]. Подобный двойственный характер поведения рутения особенно отчетливо прослеживается на диаграмме соотношений Pt-Pd-Ru, на которой он образует два самостоятельных поля (рис. 6).

По соотношению других ЭПГ и золота, а также по величине Pd/Ir отношения руды еланского

типа по существу целиком располагаются в полях составов, присущих сульфидным медно-никелевым рудам коматиит-ассоциированных месторождений. С последними их сближает и относительно пониженная величина отношения Pd/Ir (≈30). Вместе с тем при несомненном сходстве в распределении главных (Ni, Cu, Co) элементов и сопутствующих (ЭПГ, Au) этих двух типов месторождений руды еланского типа содержат в среднем в 3–5 раз меньше ЭПГ, вследствие специфических условий их формирования [2, 6, 8, 9] и вероятности (подобно месторождениям Монткалм и Рана; см. рис. 5, з) раннего (до поступления в камеру) частичного отделения из расплава сульфидного вещества [17, 20, 21, 26].

Как отмечалось, характерной особенностью руд еланского типа месторождений является сравнительно широкое развитие сульфоарсенидов Ni и Co, являющихся основными носителями платиновых металлов на других сульфидных медно-ни-

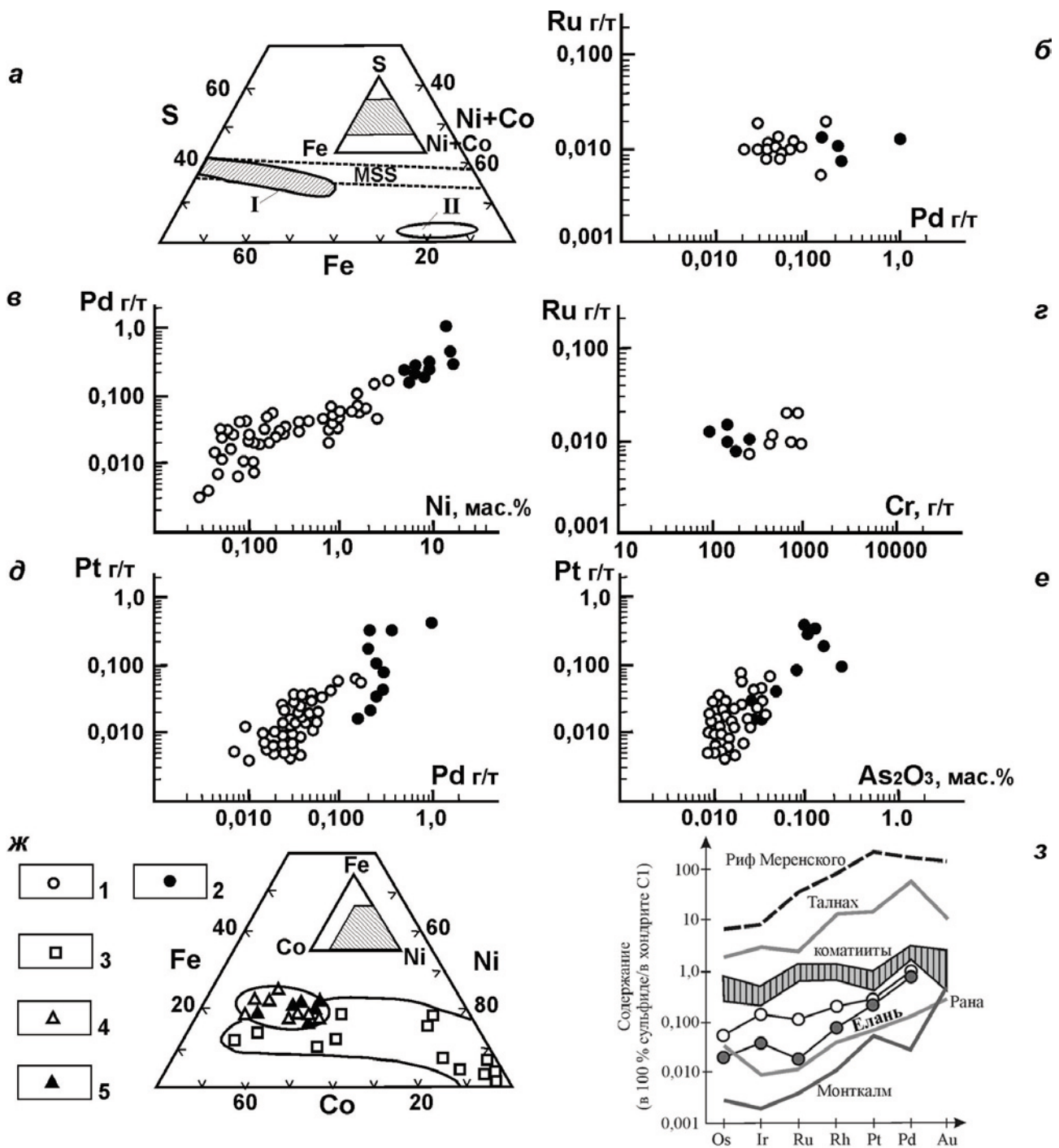


Рис. 5. Особенности распределения элементов группы платины в рудах еланского типа месторождений (по [6, 8, 10, 15, 19] с дополнениями): а – тройная диаграмма Fe-(Ni+Co)-S (мас.%) медно-никелевых руд (в пересчете на 100 % сульфидов): I – собственно магматические сульфиды Еланского месторождения, II – ремобилизованные сульфиды месторождения Дандоланд [18], пунктирные линии ограничивают поле существования “MSS” при 600 °С; б–е – бинарные диаграммы зависимостей ЭПГ, Ni, Cu и As₂O₃ в рудах Еланского месторождения; ж – тройная диаграмма состава сульфоселенидов руд норит-диоритовых интрузий в координатах Fe-Ni-Co (ат.%). 1 – вкрапленные руды; 2 – массивные руды; 3 – гетерогенные зональные сульфоселениды; 4 – гомогенные идиоморфные метакристаллы сульфоселенидов; 5 – хондрит-нормализованные содержания ЭПГ в рудах (в пересчете на 100 % различных типов месторождений) [20, 21]

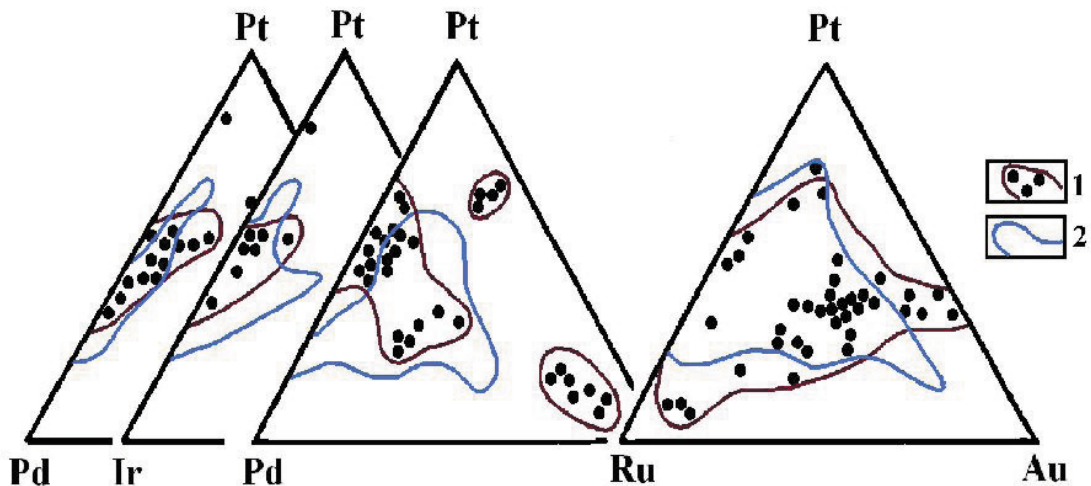


Рис. 6. Соотношение содержаний Pt, Pd, Ir, Ru и Au в рудах еланского (1) типа (по [2, 6]) и коматиит-ассоциированных месторождений (2) (по [6])

келевых месторождениях [1, 16, 17, 22, 23]. Для руд еланского типа были установлены [6, 10, 16] устойчивые корреляционные связи As с ЭПГ (см. табл. 6; рис. 5, е), что позволяет предположить о несомненной ассоциации по крайней мере части ЭПГ с арсенид-сульфоарсенидными минералами. Определение состава данных минералов (главные компоненты и платиноиды) методом рентгеноспектрального анализа ([19]; рис. 5, ж, табл. 7) позволило установить в сульфоарсенидах изоморфные примеси Os, Ir, Ru, реже – Pd и Pt. Максимальная суммарная концентрация ЭПГ не превышает 0,15 мас.%, что, вероятно, является предель-

но возможным уровнем накопления изоморфной формы платиновых металлов в сульфоарсенидах [8, 10, 15, 19].

Вместе с тем, новые аналитические данные (табл. 8) и их обобщение (23 анализа) свидетельствуют, что диапазон изменений содержаний металлов платиновой группы в минералах арсенид-сульфоарсенидного парагенезиса значителен и характеризуется преобладанием палладия, количество которого достигает 3200 г/т, над платиной с максимальным содержанием до 1200 г/т. Максимальные концентрации родия и золота составляют 1900 г/т и 2200 г/т соответственно [12].

Таблица 7

Содержание платиновых металлов в сульфоарсенидах никеля и кобальта Еланского месторождения (мас.%)

| № | скв./глуб. | Co | Ni | Fe | S | As | Sb | Os | Ir | Ru | Pt | Pd | Σ |
|----|------------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|--------|
| 1 | 8413/588,0 | 11,76 | 15,35 | 5,96 | 17,48 | 47,44 | 0,07 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | – | – | 98,16 |
| 2 | 8413/637,0 | 12,50 | 14,96 | 5,88 | 17,78 | 46,40 | 0,41 | 0,08 | 0,05 | 0,02 | – | – | 97,78 |
| 3 | 8413/637,0 | 15,79 | 10,91 | 6,04 | 18,81 | 46,40 | 0,30 | 0,08 | 0,03 | 0,02 | – | 0,02 | 98,40 |
| 4 | 8413/596,0 | 13,51 | 14,02 | 6,47 | 17,59 | 45,95 | 0,17 | – | – | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 97,76 |
| 5 | 8413/596,0 | 13,08 | 14,42 | 6,54 | 17,11 | 46,93 | 0,14 | – | 0,01 | 0,02 | – | 0,02 | 98,27 |
| 6 | 8413/629,0 | 10,72 | 15,78 | 6,53 | 16,91 | 48,24 | 0,31 | – | – | – | – | 0,02 | 98,51 |
| 7 | 8413/720,0 | 1,69 | 35,44 | 0,93 | 17,99 | 41,41 | 0,95 | – | – | – | – | – | 98,41 |
| 8 | 8413/741,0 | 3,17 | 25,70 | 5,68 | 16,68 | 49,75 | 0,24 | – | – | – | – | – | 101,22 |
| 9 | 8413/321,0 | – | 41,99 | 0,22 | 0,33 | 55,58 | 1,00 | – | – | – | – | – | 99,12 |
| 10 | 8413/346,8 | 0,03 | 42,39 | 0,10 | 0,33 | 54,10 | 2,82 | – | – | – | – | – | 99,77 |
| 11 | 8413/358,7 | 0,03 | 43,98 | 0,52 | 0,83 | 52,68 | 1,25 | – | – | – | – | – | 99,36 |
| 12 | 8413/720,0 | – | 45,69 | 0,26 | 0,40 | 54,72 | 0,24 | – | – | – | – | – | 101,40 |
| 13 | 8413/741,0 | – | 43,13 | 0,17 | 0,30 | 54,50 | 0,94 | – | – | – | – | – | 99,06 |

Примечание: 1–6 – идиоморфные гомогенные метакристаллы сульфоарсенидов; 6–13 – гетерогенные зональные агрегаты сульфоарсенидов. Прочерк – элемент не обнаружен. Анализы выполнены на микроанализаторе MS-46 “Самеса”. Чувствительность анализов на PGE – 0,01 мас.% (по [19] с дополнениями).

Таблица 8

Состав, особенности распределения благородных металлов в минералах серии кобальтин-герсдорфит сульфидных медно-никелевых руд Еланского месторождения

| № п/п | № обр. | скв. | гл. | Компоненты (мас.%) | | | | | | | | | | | | |
|-------|------------|------|-------|--------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|---------|
| | | | | Co | Ni | Fe | Cu | Pt | Pd | Rh | Ir | Au | As | Sb | S | Σ |
| 1 | Е-6-2 | 8501 | 294.0 | 30.830 | 3.620 | 1.910 | 0.150 | 0.020 | 0.070 | – | – | – | 44.120 | – | 19.210 | 99.930 |
| 2 | Е-5-1 | 8501 | 293.0 | 26.790 | 3.880 | 2.560 | 0.040 | – | – | – | – | 0.010 | 46.160 | – | 20.990 | 100.380 |
| 3 | Е-6-3 | 8501 | 294.0 | 25.220 | 10.260 | 1.180 | – | 0.060 | 0.080 | – | – | – | 45.040 | – | 18.930 | 100.770 |
| 4 | Е-3-8 | 8501 | 287.8 | 23.580 | 7.190 | 3.780 | – | – | – | – | – | 0.220 | 44.850 | – | 19.300 | 98.920 |
| 5 | Е-7-2 к* | 8501 | 397.3 | 23.660 | 7.940 | 2.430 | 0.120 | – | 0.180 | – | – | – | 45.390 | 0.200 | 19.820 | 99.740 |
| 6 | Е-8-1 к | 8501 | 403.7 | 22.560 | 10.960 | 1.720 | – | – | 0.040 | 0.190 | – | – | 45.740 | 0.170 | 19.460 | 100.840 |
| 7 | Е-10-1 | 8501 | 480.5 | 22.160 | 9.730 | 2.550 | 0.040 | 0.120 | 0.300 | 0.060 | – | – | 45.470 | 0.650 | 19.740 | 100.820 |
| 8 | Е-12-1 к | 9116 | 781.9 | 21.390 | 9.360 | 3.830 | 0.010 | – | 0.180 | – | – | – | 45.070 | 0.200 | 19.250 | 99.290 |
| 9 | Е-11-2 к | 9007 | 733.5 | 17.990 | 14.910 | 2.340 | 0.670 | – | 0.090 | – | – | – | 44.210 | 0.110 | 19.130 | 99.450 |
| 10 | Е-15-1 к | 9116 | 613.0 | 16.660 | 12.400 | 4.440 | 0.060 | – | 0.310 | 0.010 | 0.030 | 0.010 | 46.370 | 0.460 | 19.580 | 100.330 |
| 11 | Е-15-2 к | 9116 | 613.0 | 16.520 | 12.190 | 4.850 | 0.010 | 0.010 | – | – | – | 0.010 | 46.580 | 0.630 | 19.090 | 99.890 |
| 12 | Е-11-2 ц | 9007 | 733.5 | 16.400 | 15.740 | 2.730 | 0.110 | 0.070 | 0.040 | – | – | – | 44.930 | 0.200 | 19.240 | 99.460 |
| 13 | Е-15-2в к | 9116 | 613.0 | 16.480 | 12.180 | 6.810 | 0.040 | – | 0.020 | – | – | 0.020 | 45.530 | 0.540 | 19.430 | 101.050 |
| 14 | Е-152в-с ц | 9116 | 613.0 | 16.160 | 12.900 | 4.390 | 0.050 | 0.010 | – | 0.010 | – | 0.010 | 46.820 | 0.510 | 19.060 | 99.920 |
| 15 | Е-15-2-с ц | 9116 | 613.0 | 16.090 | 12.970 | 5.410 | 0.060 | – | – | 0.010 | – | – | 46.260 | 0.380 | 19.070 | 100.250 |
| 16 | Е-15-1-с ц | 9116 | 613.0 | 15.540 | 13.010 | 4.520 | 0.060 | 0.080 | 0.070 | – | – | 0.040 | 46.590 | 0.370 | 19.720 | 100.000 |
| 17 | Е-8-1-с ц | 8501 | 403.7 | 15.300 | 16.950 | 3.380 | 0.040 | – | 0.050 | 0.060 | – | – | 44.880 | 0.410 | 19.560 | 100.630 |
| 18 | Е-7-2-с ц | 8501 | 397.3 | 13.940 | 17.940 | 3.580 | 0.050 | – | 0.160 | – | – | – | 44.460 | 0.510 | 19.120 | 99.760 |
| 19 | Е-9-2-с ц | 8501 | 421.4 | 12.780 | 20.370 | 1.180 | – | – | 0.330 | – | – | – | 45.070 | 0.160 | 19.240 | 99.130 |
| 20 | Е-7-2-d | 8501 | 397.3 | 11.180 | 21.330 | 2.950 | 0.020 | – | 0.200 | – | – | – | 44.650 | 0.450 | 19.270 | 100.050 |
| 21 | Е-12-1 ц | 9116 | 781.9 | 10.450 | 17.350 | 6.140 | 0.030 | – | 0.280 | 0.150 | – | – | 45.290 | 0.270 | 19.390 | 99.350 |
| 22 | Е-10-2 | 8501 | 480.5 | 10.120 | 21.030 | 3.450 | 0.010 | – | 0.290 | – | – | – | 45.770 | 0.100 | 19.830 | 100.600 |
| 23 | Е-9-1-с | 8501 | 421.4 | 0.630 | 34.700 | 0.320 | – | – | 0.130 | – | – | – | 45.300 | 0.620 | 19.300 | 101.000 |

Примечание: анализы выполнены в ИГЕМ РАН на микроанализаторе MS-46 “Самеса”. Аналитик И. П. Лапутина.

Эти данные в совокупности с отсутствием достаточно четких корреляционных зависимостей между благороднометалльными и рудообразующими элементами в минералах группы кобальтин-герсдорфит (табл. 9) позволяет предполагать не только частичные вхождения ЭПГ и Au в сульфоарсениды, но и вероятность наличия самостоятельных форм нахождения платиновых минералов в виде выделений малых размеров (наноминералов).

Таблица 9

Значение парных коэффициентов корреляции элементов в минералах группы кобальтин-герсдорфит (доверительный интервал 0.5)

| Элемент | Co | Ni | Fe | Cu | Pt | Pd | Rh | Ir | Au | As | Sb | S |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|---|
| S | 0.34 | -0.33 | -0.11 | -0.09 | -0.10 | -0.18 | -0.06 | 0.01 | -0.08 | -0.30 | -0.35 | |
| Sb | -0.69 | 0.59 | 0.21 | -0.22 | 0.20 | 0.25 | 0.09 | 0.16 | -0.13 | 0.54 | | |
| As | -0.36 | 0.19 | 0.33 | -0.26 | 0.19 | 0.19 | 0.16 | 0.24 | 0.06 | | | |
| Au | 0.12 | -0.18 | 0.18 | -0.12 | -0.01 | -0.17 | -0.09 | 0.00 | | | | |
| Ir | -0.05 | -0.03 | 0.17 | -0.02 | -0.08 | 0.36 | -0.02 | | | | | |
| Rh | -0.05 | 0.01 | 0.12 | -0.14 | 0.04 | 0.20 | | | | | | |
| Pd | -0.33 | 0.28 | 0.03 | -0.12 | 0.17 | | | | | | | |
| Pt | 0.11 | -0.11 | -0.06 | -0.06 | | | | | | | | |
| Cu | 0.12 | -0.08 | -0.10 | | | | | | | | | |
| Fe | 0.01 | -0.28 | | | | | | | | | | |
| Ni | -0.95 | | | | | | | | | | | |

Одним из важных носителей ЭПГ в рудах еланского типа является новая палладий-иридий-платиновая разновидность брейтгауптита [6, 12], слагающего изометричные и частично ограненные мелкие (сотые доли мм) включения в сульфоарсенидах вкрапленных руд. Особенности состава этого минерала определяется весьма высоким содержанием благородных металлов

(табл. 10). Помимо обычных примесей Fe, Cu, As и S, в нём установлены относительно стабильные и высокие содержания иридия (0,44–0,60 мас.%) и платины (0,30–0,47 мас.%), варьирующие в широком интервале концентрации палладия (от 0,11 до 0,84 мас.%), и менее значимые – родия (0,01 мас.%), а также спорадические – золота (до 0,45 мас.%).

Таблица 10

Состав брейтгауптитов сульфидных медно-никелевых руд Еланского месторождения

| № обр. | Привязка | | Компоненты (мас.%) | | | | | | | | | | | | |
|--------|----------|-------|--------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| | скв. | гл. | Ni | Co | Fe | Cu | Pt | Pd | Rh | Ir | Au | As | Sb | S | Σ |
| Е-2-3 | 8501 | 287.6 | 32.330 | – | 2.040 | 0.180 | 0.300 | 0.500 | 0.010 | 0.490 | – | 2.560 | 61.130 | 0.100 | 99.640 |
| Е-2-3в | 8501 | 287.6 | 32.840 | – | 0.250 | 0.240 | 0.310 | 0.840 | 0.010 | 0.440 | – | 2.750 | 61.560 | 0.090 | 99.330 |
| Е-2-3б | 8501 | 287.6 | 31.950 | – | 0.010 | 0.170 | 0.470 | 0.110 | 0.010 | 0.600 | 0.450 | 1.660 | 64.400 | 0.110 | 99.940 |

Примечание: анализы выполнены в ИГЕМ РАН на микроанализаторе MS-46 “Самеса”. Аналитик И. П. Лапутина.

Извлечение ЭПГ из руд Еланского типа (по данным «Механообра») составляет 55–66 %, а платины (по результатам исследований ЦНИГРИ) до 94,3 %. Институтом «Гипроникель» в 1988 г. было выполнено исследование технологической пробы руды Еланского месторождения, содержащей 0,08–0,12 г/т Pt, 0,06–0,07 г/т Pd, 0,003–0,004 г/т Ru, 0,04 г/т Rh, 0,05 г/т Os и < 0,01 г/т Ir. При среднем извлечении ЭПГ в 64,3 % содержание платины в сульфидном концентрате составило 0,39–0,64 г/т (извлечение 54,6–65,8 %), а палладия – 0,31–0,93 г/т (извлечение 48,9–75,8 %). За основные технологические показатели сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд рассматриваемого объекта приняты: содержание ЭПГ в руде – 0,35 г/т, в концентрате – 2,13 г/т, в хвостах – 0,14 г/т, в окатышах – 2,18 г/т. Соответствующие показатели для золота и серебра следующие: 0,22 и 3,25 г/т (руда), 1,58 и 24,90 г/т (концентрат), 0,06 и 0,73 г/т (хвосты), 1,58 и 24,90 г/т (окатыши). Таким образом, при отработке Еланского и Елkinsкого месторождений возможно попутное извлечение платиновых металлов. При этом могут быть использованы технологии, апробированные на известных отечественных и зарубежных месторождениях.

При достаточно широких вариациях содержания ЭПГ и Au в рудах Еланского месторождения по соотношению благородных металлов они вместе с тем целиком располагаются в полях составов, присущих сульфидным медно-никелевым рудам

коматиит-ассоциированных месторождений (см. рис. 4, б; рис. 6). С последними, как отмечалось, их сближает и относительно пониженная величина Pd/Ir (~30) отношения. Подобный характер распределения ЭПГ и Au в высоконикелистых рудах, как отмечалось, является следствием специфических условий формирования еланского типа рудномагматической системы [6, 8, 9, 11, 15], которые будут рассмотрены в последующей статье (Вестник Воронеж. ун-та. Сер.: Геология, 2011, № 2).

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ и Госконтракта Роснауки № 02.740.11.021

ЛИТЕРАТУРА

1. Додин Д. А. Платинометалльные месторождения России / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, Б. А. Яцкевич. – СПб. : Наука, 2000. – 755 с.
2. Чернышов Н. М. Промышленно-генетические типы сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений новой никеленосой провинции России и проблема их освоения / Н. М. Чернышов // Вест. Воронеж. ун-та. Естеств. науки. – 1993. – Сер. 2. – Вып. 1. – С. 188–215.
3. Чернышов Н. М. Формационно-генетические типы платинометалльных проявлений Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов // Платина России. Пробл. развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов. – М., 1994. – С. 85–103.
4. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Воронежского кристаллического массива (Центральная

Россия) / Н. М. Чернышов // Материалы Третьего Международ. горно-геолог. форума Мингео Сибирь и Международ. семинара «Платина в геологических формациях мира». – Красноярск: КНИИГиМС, 2010. – С. 231–243.

5. Чернышов Н. М. Золото-платинометалльные рудообразующие системы и их эволюция в процессе формирования докембрийской литосферы (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Структура, свойства, динамика и минералогия литосферы Восточно-Европейской платформы. Матер. XVI Международ. конференции 20–24 сентября 2010 г. под ред. чл.-корр. РАН Н.М. Чернышова, чл.-корр. РАН А. А. Моловичко. Воронеж : Научная книга, 2010. Т. II. – С. 314–319.

6. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. – 448 с.

7. Додин Д. А. Платина России: состояние и перспективы / Д. А. Додин [и др.] // Литосфера. – 2010. – № 1. – С. 3–36.

8. 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.

9. 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.

10. 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. ун-та. Сер.: Геол. – 1998. – № 5. – С. 120–151.

11. 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.

12. 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. ун-та. Сер.: Геол. – 2000. – № 5 (10). – С. 136–148.

13. Чернышова М. Н. Дайки сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Воронежского кристаллического массива (Центральный Россия) / М. Н. Чернышова. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. – 368 с.

14. Чернышов Н. М. Цветные и благородные металлы в недрах Воронежского края и перспективы их освоения / Н. М. Чернышов, М. Н. Чернышова // Регионы: системы, экономика, управление. – 2009. – № 2 (5). – С. 133–153.

15. 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.

16. Чернышова М. Н. Закономерности распределения, условия и формы концентрирования платиноидов и золота в сульфидных медно-никелевых рудах Воронежского региона в связи с комплексным освоением месторождений / М. Н. Чернышова, Н. М. Чернышов // Сб. науч. работ по итогам выполнения проектов РФФИ 2000–2005 гг. по Воронежской области. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. – С. 102–109.

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

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. Лихачёв А. П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения / А. П. Лихачёв. – М. : Эслан, 2006. – 496 с.

23. 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.

24. 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.

25. Маракушев А. А. Минералого-петрографические критерии рудоносности изверженных пород / А. А. Маракушев, Н. И. Безмен. – М. : Недра, 1992. – 317 с.

26. Barrie C. T. Geochemical constraints on the genesis of the Montcalm gabbroic complex and Ni-Cu deposit, western Abitibi Subprovince Ontario / C. T. Barrie, A. J. Naldrett, D. W. Davis // Canad. Mineralogist. – 1990. – V. 28. – № 3. – P. 451–474.

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

petrology@list.ru

Тел. 8 (473) 220-86-81

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.

petrology@list.ru

Tel. 8 (473) 220-86-81

М. Н. Чернышова, доцент кафедры минералогии и петрологии, доктор геолого-минералогических наук

petrology@list.ru

Тел.: 8 (473) 220-84-34

M. N. Chernyshova, the assistant professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences

petrology@list.ru

Tel. 8 (473) 220-84-34