

ЛИТЕРАТУРА

1. Новгородова М.И. Самородные металлы. -М., 1987. - 48 с.
2. Савко А.Д., Шевырев Л.Т., Ильяш В.В., Божко Е.Н. Золото и редкие минералы в осадочном чехле Воронежской антеклизы // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1996. -№ 1. -С. 133-137.
3. Савко А.Д., Шевырев Л.Т., Лоскутов В.В. Эксгальциционно-осадочная металлоносность Воронежской антеклизы - новые горизонты поисков рудных месторождений в осадочном чехле. Статья 1. Интерметаллиды: локализация, типы, состав // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1999. -№ 6. -С.139-154
4. Фрондел Дж. Минералогия Луны. -М., 1978. -334 с

УДК 553:481:669.24/25

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***

Воронежский государственный университет

**Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии
и геохимии РАН, Москва*

На основе обширного аналитического материала (свыше 250 микрозондовых анализов) в статье приводятся новые данные о составе главных и второстепенных минералах и некоторые особенности распределения в них элементов платиновой группы (ЭПГ) и золота. В рудах Еланского месторождения впервые установлен брейтгауптит с высокими содержаниями благородных металлов (ЭПГ до 19,2 кг/т, Au до 4,5 кг/т), присутствие которых ранее в этом минерале не фиксировалось. Палладий-иридий-платиновая разновидность брейтгауптита рассматривается в качестве одного из наиболее значимых носителей ЭПГ в рудах еланского типа.

Условия локализации оруденения, текстурно-структурные типы руд и особенности распределения в них благородных металлов

Новые, ранее неизвестные в России и за рубежом высоконикелистые месторождения (Еланское, Елкинское) и рудопроявления (Троицкое, Новопокровское и др.), ассоциирующие с норит-диоритовыми субвулканическими интрузивами (2065-2050±14 млн.лет), локализируются в достаточно протяженной (свыше 700 км) реактивизированной в раннем протерозое Тамбовско-Волгоградской рифтогенной структуре раннеархейского заложения [1,2]. Еланское месторождение, приуроченное к крутопадающему штокообразному интрузиву (рис.1), располагается в северо-восточном эндоконтакте крупного (120 км²) сложнодифференцированного и многофазного Елань-Коленовского плутона, принадлежащего к более раннему мамонскому ультрамафит-мафитовому комплексу (2100-2080±15 млн.лет) ВКМ. Вмещающие платиноидно-медно-никелевое оруденение нориты отличаются рядом специфических, присущих лишь еланскому типу РМС, признаков [2]: 1) неупорядоченным чередованием лейко-, мезо-, иногда меланократовых мелкозернистых порфировидных амфибол- и кварц-биотит-калишпатсодержащих разновидностей, обогащенных ксенолитами ультрамафитов; 2) высокомагнезиальным составом ортопироксена (Fs₁₂₋₂₂) и низкокальциевым плагиоклазом (An₃₀₋₆₀), крайне ограниченным развитием бедного железом (FeO=9-

10 мас.%) и богатого кальцием (до 16 мас.%) и магнием (16-17 мас.%) клинопироксена, оливина (Fa₂₂₋₂₆), постоянным присутствием высокохромистых цинксодержащих хромшпинелидов; 3) повышенной магнезиальностью (MgO до 17 мас.%) при одновременно высоком содержании SiO₂ (до 60 мас.%), щелочей (2,5-4,9 мас.%, Na₂O≥K₂O), никеля и его резким преобладанием над медью (Ni/Cu=3-10), серы (0,2-1,0 мас.%), состав которой обогащен легким изотопом ($\delta^{34}\text{S}$ от -0,2 до -3,5‰); 4) устойчиво высокими корреляционными связями Fe, Ni, Co, Cu, S, As; 5) высокой (на порядок выше кларковой) хромистостью, достигающей в наиболее меланократовых разностях более 0,5 мас.% Cr₂O₃, 6) обогащенностью легкими РЗЭ и крупноионными литофильными элементами (Rb, Ba, K); высокими величинами отношений Ce/Yb, Ce/Nd, Ba/Zn, ¹⁸O/¹⁶O ($\delta^{18}\text{O}>6\%$), ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ($\Sigma\text{Sr}>1$).

Различные по мощности (от 2-5 до 35-40 м) и протяженности (от 300-600 до 1500 м) рудоносные зоны и тела Еланского месторождения, наследующие крутопадающий (65-85°) характер залегания и элементы внутреннего строения субвулканической колонны, сложены преимущественно (85-87%) вкрапленными (Ni=1,31 мас.%, Co=0,04 мас.%, Cu=0,14 мас.%) и вкрапленно-агрегатными (Ni=5,48 мас.%, Co=0,25 мас.%, Cu=0,19 мас.%) рудами с маломощными залежами массивных (Ni=8,01 мас.%, Co=0,19 мас.%, Cu=0,07 мас.%; [2]). Среди количественно преобладающих на месторождении вкрап-

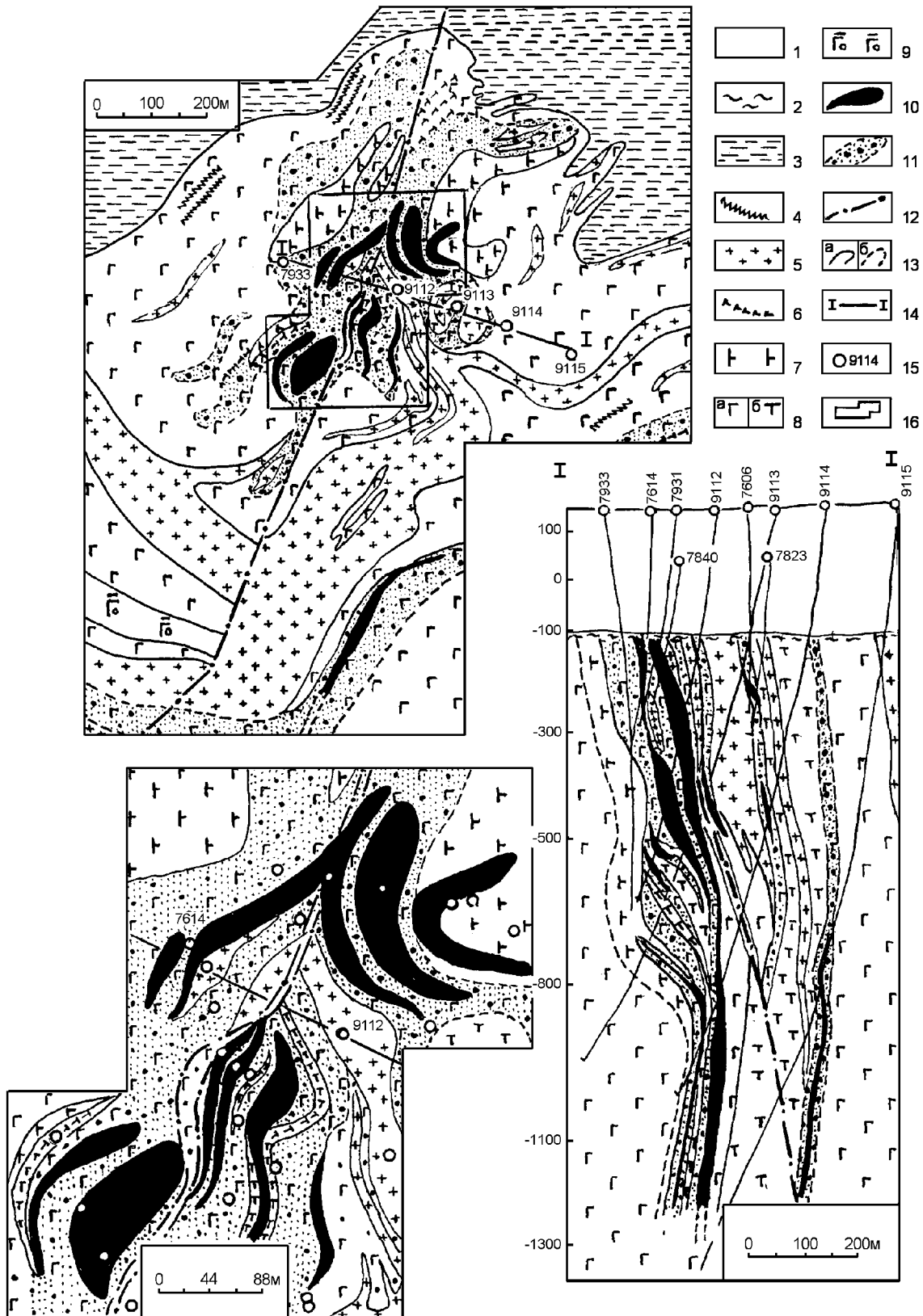


Рис.1. Геологическая карта Еланского месторождения (по [1]): 1 - породы платформенного чехла (на разрезе); 2 - кора выветривания на кристаллическом фундаменте (на разрезе); 3 - песчаниково-сланцевые отложения воронцовской серии (PR¹); 4 - дайки порфиров, лампрофиров; 5 - диориты второй интрузивной фазы еланского комплекса; 6 - норит-порфириты жильные; 7 - нориты тонкозернистые ("фелизические"); 8 - нориты мелко-среднезернистые (а) и порфировидные нориты (б); 9 - габбро-нориты оливковые и безоливиновые мамонского комплекса; 10 - рудные тела; 11 - зоны бедной сульфидной вкрапленности; 12 - тектонические нарушения; 13 - геологические границы: установленные (а), предполагаемые (б); 14 - линия геологического разреза; 15 - скважины и их номера; 16 - контур врезки.

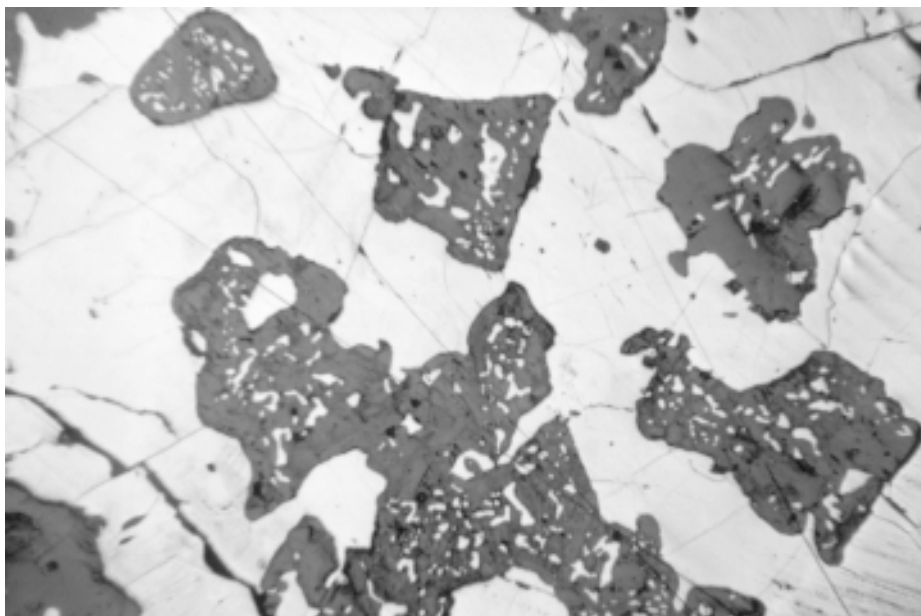


Рис.2. Субграфические выделения пирротина (белое) в силикатах (темное), разитых в массе сульфидного агрегата. Полированный шлиф. Скв. 8501, гл.287,2 м. Увел х65.

ленных руд выделяются тонковкрапленные бедные (содержание сульфидов 5-12%, реже до 15%), более богатые равномерновкрапленные (сульфидов от 15-20% до 35-40%) и крупновкрапленные (сульфидов от 10-15% до 30-35%) или изометрично-вкрапленные ("осьпенные") разновидности.

По содержанию главных рудообразующих элементов (Ni,Co,Cu) руды Еланского месторождения принадлежат к маломедистым высоконикелистым с повышенными концентрациями Co, значительно обогащены изотопно легкой серой ($\delta^{34}\text{S}$ до -11,6‰) и отличаются широким комплексом попутных полезных (Au, Ag,Pt,Pd,Ir,Rh,Se,Te,Mo) и вредных (As,Sb,Bi,Cr) элементов.

Анализ содержаний ЭПГ и золота в различных типах и разновидностях существенно никелевых руд Еланского месторождения свидетельствует [2,3] о крайне неравномерном распределении благородных металлов. Максимальные их содержания установлены в массивных и вкрапленно-агрегатных разновидностях – среднее по 9 анализам (г/т): Pt - 0,27, Pd - 0,44, Ru - 0,19, Au - 0,86. Более или менее стабильные концентрации благородных металлов характерны для тонковкрапленных руд (г/т): Pt-0,20, Pd - 0,34, Ru- 0,24, Au - 0,97 (среднее по 7 анализам), тогда как крупновкрапленные и "осьпенные" разновидности отличаются пониженными и крайне непостоянными содержаниями – среднее по 7 анализам (г/т): Pt - 0,08, Pd - 0,09, Ru - 0,17, Au - 0,22, Ag - 1,96. Концентрации редких платиноидов в большинстве случаев находятся на уровне чувствительности анализа и в наиболее богатых пробах достигают (г/т): Os - 0,006, Ir - 0,01, Rh - 0,014.

Состав рудных минералов и особенности распределения в них благородных металлов

В сульфидных медно-никелевых рудах Еланского месторождения к настоящему времени установлено более 20 рудных минеральных видов [2,4]. Из них ведущими в количественном отношении являются минералы группы пирротина, пентландита и в меньшей мере халькопирит. Характерно повсеместное присутствие в рудах арсенидов, сульфоарсенидов и антимонидов никеля и кобальта, а также высокохромистых цинксодержащих хромшпинелидов. Спорадически встречаются макинавит, виоларит, марказит, пирит, графит, молибденит, магнетит, ильменит и некоторые другие.

Пирротин является самым распространенным моносульфидом и в подавляющей массе руд преобладает над всеми другими рудными минералами. Его содержание в сульфидной части составляет до 75-85% и лишь в некоторых разновидностях вкрапленных и массивных руд он встречается в подчиненных по отношению к другим рудообразующим минералам количествах (10=20 отн.%). Представлен пирротин несколькими разновозрастными выделениями (не менее трех). Самый ранний из них парагенетически связан с первичными силикатами и окислами пород, присутствуя спорадически в виде субграфических "эвтектоидных" сростаний с пироксеном (рис.2) и каплевидных пойкилитовых включений в хромшпинелидах. Пирротин-2 слагает главную массу всех вкрапленников, гнезд, шлиров и жилообразных тел массивных руд. Чаще всего это аллотриоморфнозернистый различной крупности (от мелко- до крупнозернистого) иногда неравномернозернистый агрегат в массе которого находятся все другие рудные минералы. В некоторых случаях он наблюдается в виде реликтовых (от замещения) зерен в крупных кристаллах пентландита и выделениях сульфоарсенидов. И, наконец, мелкие неправильные изолированные зерна и агрегаты, тонкая "сыпь", игольчатые и прожилковидные обо-

собления пирротина-3 ассоциируют с вторичными (постмагматическими и наложенными) (роговая об-

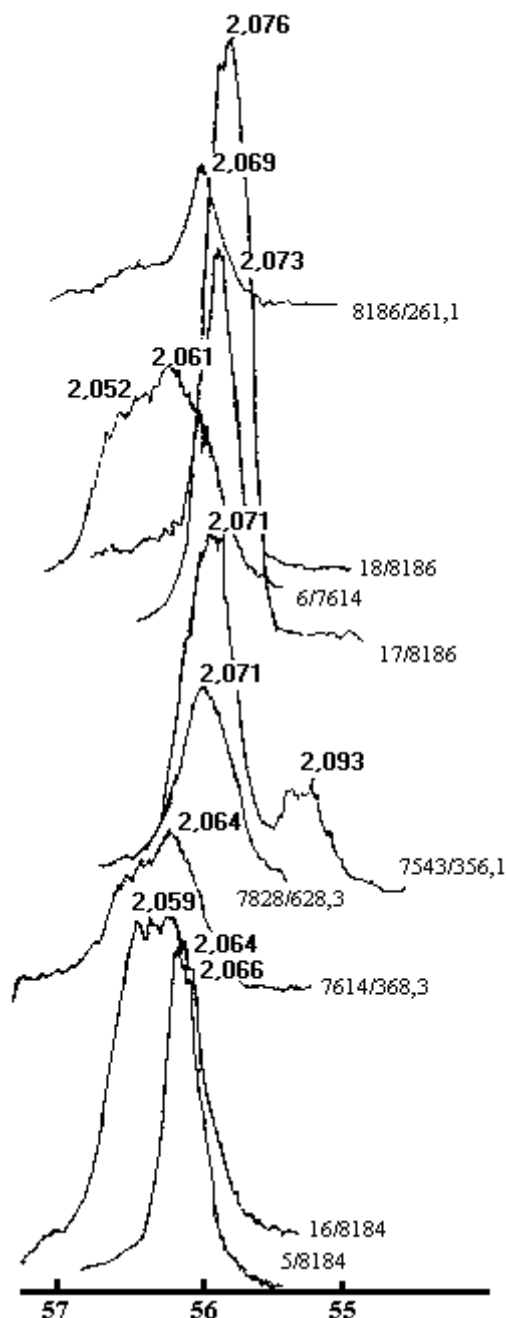


Рис.3. Участки дифрактограмм пирротинов медно-никелевых руд Еланского месторождения. Отчетливо видно, что сильное отражение d_{102} гексагонального пирротина, представлено одним пиком, а у моноклинного пирротина расщеплено на два отражения d_{202} и d_{202} и характеризуется двумя пиками. 7828/628,3 – числитель-номер скважины, знаменатель – глубина; 5/8184 – числитель-номер образца, знаменатель – номер скважины.

манка, актинолит-тремолит, биотит) и поздними (тальк, хлорит и др.) силикатами.

Детальное наблюдение под микроскопом пирротина-2, как преобладающего рудообразующего минерала во всех типах и разновидностях медно-никелевых руд Еланского месторождения, показало неоднородность внутреннего строения индивидов и

агрегатов этого минерала. В его зернах фиксируются участки, отличающиеся характером анизотропии и двуотражения, степенью окисления поверхности и магнитными свойствами, что обусловлено, вероятно, вариациями структуры и состава моносulfида железа. В настоящее время, как известно [5], могут быть выделены три отчетливо различающиеся структурные разновидности пирротинов: троилит-стехиометрическая фаза состава FeS, промежуточные гексагональные пирротины (Po_g) и их разнообразные метастабильные сверхструктурные модификации (Fe_9S_{10} - $Fe_{11}S_{12}$) и моноклинный пирротин состава $Fe_7S_8(Po_m)$. Оптическими наблюдениями, рентгенометрическими исследованиями (рис.3.) с привлечением метода магнитной порошковой дифракции было установлено, что среди пирротина-2 развиты как однофазные магнитные (Po_m) и немагнитные (Po_g) фазы, так и по преимуществу их смеси. Причем последние представлены либо сочетанием однородных, но разных по магнитным свойствам зерен, либо сростками магнитной и немагнитной фаз в пределах одного зерна. Наиболее часто фиксируется линзовидно-пластинчатое внутреннее строение зерен, сформировавшихся, очевидно, вследствие распада моносulfидного твердого раствора. Менее развиты сростки, образовавшиеся в результате замещения немагнитного пирротина магнитным. Последний образует каемки по периферии зерен, закономерно распределенные вроски по трещинам и вокруг силикатных включений. Еще реже наблюдаются однородные зерна троилита (T_z) или совместные T_z-Po_g сростания.

Сложность строения пирротиновой матрицы руд вызвана вариацией состава этого минерала, что подтверждается как результатами определения состава в зависимости от межплоскостного расстояния d_{102} (дифрактометрический анализ 32 проб.), так и данными микрозондового рентгеноспектрального анализа (табл.1)¹. Моносulfид железа Еланского месторождения характеризуется широким концентрационным интервалом существования. Диапазон изменения содержания металла (железо или железо с примесью никеля, кобальта и меди) по данным рентгеноспектрального анализа составляет 46,0-50,0 ат. % ($x = 47,09\%$ $n = 54$)². По частоте встречаемости и уровню концентрации (рис.4) наиболее развиты моноклинная и гексагональная модификации, троилит встречается в единичных случаях.

Помимо главных элементов пирротины Еланского месторождения содержат ряд примесных, к которым относятся Ni, Co иногда Cu, платиноиды, мышьяк, сурьма и др. Никель присутствует во всех пробах и является важнейшим из элементов-примесей. Его содержания в целом колеблются в весьма широких пределах от 0,11 до 3,78%. При этом большая часть анализов отвечает узкому диа-

¹ микрозондовый анализ по точности определения основных компонентов (2-3 отн%) значительно уступает рентгеновскому.

² x - среднее содержание элемента (в ат. и мас. %); n - количество анализов.

пазону 0,1-0,5%. Кобальт по уровню концентрации уступает никелю. Общий диапазон изменения содержания этого элемента составляет 0,0-0,42% (x=0,09%; n = 22), однако значения, превышающие 0,1%, отмечаются в единичных случаях. Характерными примесными элементами пирротинов являются также мышьяк, с пределами изменений от 0,0 до 1,1% (x= 0,11%; n= 22), и спорадически сурьма.

Отдельные анализы (на уровне чувствительности микронзондового метода) показывают содержание в пирротинах примеси благородных металлов: родия - 200 г/т, платины - 100 г/т, Au - 200 г/т.

Пентландит, являющийся главным носителем полезных компонентов - никеля и кобальта - руд, развит во всех их структурно-морфологических типах и разновидностях. Для его выделений, точно также как и в рудах других медно-никелевых месторождений [6] характерны три морфолого-генетические разновидности: а) пластинчатые, пламенивидные, иногда розетковидные вроски в пирротине, тяготеющие к трещинам, периферии и посторонним включениям в зернах последнего; б) изометрические и гипидиоморфные отдельные порфирировидные индивиды, их цепочки и крупнозернистые неправильные агрегаты в моносльфидной матрице; и, наконец, в) петлеобразные и прожилковидные обособления в интерстициях пирротиновых выделений. Примечательно, что в отдельных участках развития руд особенно богатых по концентрации пентландита, его округлые зерна и их агрегатные обособления содержат значительное количество мелких (тысячные доли мм), очевидно реликтовых от замещения пирротиновых включений разнообразных очертаний.

Во вкрапленных рудах развиты преимущественно первые две разновидности пентландита. Они распространены более или менее равномерно, находясь в ассоциации с пирротином, иногда халькопиритом и сульфоарсенидами, и составляют, в общем, от 5-7 до 10-12% объема сульфидной массы. В более богатых

Таблица 1
Состав и формулы пирротинов медно-никелевых руд Еланского месторождения

№ п/п	№ обр.	Компоненты (мас. %)											Формула	
		Fe	Ni	Co	Cu	Rh	Pd	Au	Pt	S	As	Sb		Σ
1.	Е-15-3	59,700	0,410	0,090	-	0,020	-	-	-	39,030	н.о.	0,070	99,320	(Fe ₈₉₀ Ni _{0,032} Co _{0,011} Rh _{0,001}) _{7,994} (S _{9,986} As _{0,55} Sb _{0,004}) _{9,045}
2.	Е-14-2	59,670	0,320	0,070	-	н.о.	н.о.	н.о.	39,360	н.о.	0,090	99,590	(Fe ₈₉₂ Ni _{0,040} Co _{0,009}) _{7,921} (S _{9,046} As _{0,008} Sb _{0,005}) _{9,079}	
3.	Е-8-2	58,230	0,940	0,410	-	0,020	-	-	39,210	н.о.	-	98,810	(Fe ₇₇₁₃ Ni _{0,118} Co _{0,051} Rh _{0,001}) _{7,883} (S _{9,047} As _{0,069}) _{9,116}	
4.	Е-8-5	59,570	0,880	0,090	-	н.о.	-	н.о.	39,690	0,160	н.о.	100,390	(Fe ₇₈₀₅ Ni _{0,110} Co _{0,011}) _{7,924} (S _{9,059} As _{0,016}) _{9,075}	
5.	Е-7-5	56,970	3,780	0,260	-	н.о.	-	н.о.	39,410	-	н.о.	100,420	(Fe ₇₄₈₁ Ni _{0,472} Co _{0,032}) _{7,985} S _{9,015}	
6.	Е-7-7	59,250	0,790	0,090	0,030	н.о.	-	н.о.	39,560	0,320	н.о.	100,040	(Fe ₇₇₉₂ Ni _{0,099} Co _{0,011} Cu _{0,003}) _{7,905} S _{9,063}	
7.	Е-8-4	59,930	3,110	0,420	-	н.о.	-	0,020	39,080	0,070	н.о.	99,630	(Fe ₇₅₆₆ Ni _{0,329} Co _{0,033} Au _{0,001}) _{7,983} (S _{9,012} As _{0,007}) _{9,019}	
8.	Е-10-4	59,210	1,170	0,060	-	н.о.	-	н.о.	39,650	0,100	н.о.	100,190	(Fe ₇₇₇₁ Ni _{0,146} Co _{0,007}) _{7,924} (S _{9,065} As _{0,010}) _{9,075}	
9.	Е-10-6	59,340	1,180	0,100	-	н.о.	-	н.о.	39,540	0,050	н.о.	100,210	(Fe ₇₇₉₂ Ni _{0,147} Co _{0,012}) _{7,931} (S _{9,044} As _{0,005}) _{9,049}	
10.	Е-10-6а	58,990	1,180	0,080	-	н.о.	-	н.о.	39,730	0,060	н.о.	100,040	(Fe ₇₇₄₇ Ni _{0,147} Co _{0,010}) _{7,904} (S _{9,089} As _{0,006}) _{9,095}	
11.	Е-11-4	59,110	0,510	0,080	-	н.о.	-	н.о.	39,660	1,100	н.о.	100,460	(Fe ₇₇₅₅ Ni _{0,064} Co _{0,010}) _{7,824} (S _{9,064} As _{0,108}) _{9,172}	
12.	Е-12-2	60,360	0,430	0,070	-	н.о.	-	н.о.	39,220	0,210	н.о.	100,290	(Fe ₇₉₂₅ Ni _{0,054} Co _{0,009}) _{7,998} (S _{8,982} As _{0,021}) _{9,003}	
13.	Е-12-4	60,220	0,340	0,150	-	н.о.	-	н.о.	39,920	0,100	н.о.	100,730	(Fe ₇₈₃₇ Ni _{0,042} Co _{0,019}) _{7,918} (S _{9,073} As _{0,010}) _{9,083}	
14.	Е-13-4	60,340	0,310	0,060	-	н.о.	0,010	н.о.	39,870	0,130	н.о.	100,720	(Fe ₇₈₇₆ Ni _{0,038} Co _{0,007} Pd _{0,001}) _{7,922} (S _{9,065} As _{0,013}) _{9,078}	
15.	Е-6-6	59,930	0,130	-	-	-	-	-	39,580	н.о.	-	99,640	(Fe ₇₈₉₈ Ni _{0,016}) _{7,914} S _{9,086}	
16.	Е-9-а	59,050	1,280	0,060	-	-	-	-	39,340	0,070	-	99,800	(Fe ₇₈₈₈ Ni _{0,161} Co _{0,007}) _{7,936} (S _{9,038} As _{0,000}) _{9,108}	
17.	Е-5-4	59,340	0,300	-	-	-	-	-	39,370	-	-	99,010	(Fe ₇₈₆₈ Ni _{0,038}) _{7,906} S _{9,094}	
18.	Е-3-6	60,04	0,110	-	-	-	-	-	39,020	н.о.	-	99,770	(Fe ₈₀₀₉ Ni _{0,014}) _{8,023} S _{8,977}	
19.	Е-4-2	59,800	0,170	-	-	-	-	-	39,530	0,020	-	99,52	(Fe ₇₈₉₁ Ni _{0,021}) _{7,913} (S _{9,088} As _{0,002}) _{9,088}	
20.	Е-2-6а	59,620	0,470	-	-	-	-	-	39,470	0,020	-	99,580	(Fe ₇₈₆₇ Ni _{0,039}) _{7,926} (S _{9,073} As _{0,002}) _{9,074}	
21.	Е-2-6	59,960	0,18	-	-	-	-	-	39,310	0,070	-	99,520	(Fe ₇₉₂₃ Ni _{0,023}) _{7,946} (S _{9,048} As _{0,007}) _{9,055}	
22.	Е-8-в	59,88	0,470	-	-	-	-	-	39,800	-	-	100,150	(Fe ₇₈₅₁ Ni _{0,039}) _{7,910} S _{9,080}	

Примечание: здесь и далее: прочерк - элемент не обнаружен; н.о. - элемент не определялся. Анализы выполнены в ИГЕМ РАН на микроанализаторе MS-46 "Сатеса" Аналитик И. П. Лялуткина.