

УДК 550.42 : 552.311(477)

И. А. Самборская, Г. В. Артеменко, А. В. Мартынюк, И. Н. Бондаренко

## Геохимия рудных элементов в расслоенных мафитах и ультрамафитах Александровской структуры (Среднеприднепровский мегаблок Украинского щита)

Ультрамафиты Александровской структуры характеризуются нормальной и повышенной никеленосностью. Максимальный уровень накопления ванадия и титана наблюдается в габброидах. По геохимическим признакам концентрация никеля, кобальта и меди происходила в сульфидных минералах. Медно-никелевым рудам свойственна устойчивая парагенетическая ассоциация — пирротин, пентландит, халькопирит.

E-mail: regul@igmof.gov.ua

**Введение.** На Среднеприднепровском мегаблоке широко распространены архейские мафит-ультрамафитовые интрузии, генетически связанные с вулканогенными образованиями зеленокаменных поясов. Они разделяются на интрузии магнезиальной дунит-гарцбургитовой и кальций-магнезиальной габбро-перидотитовой формаций. С этими интрузиями связаны многочисленные рудопроявления никеля, кобальта, меди, золота, хрома, асбеста и др. [1, 3–6, 9, 11, 13–18]. Авдотьевско-Александровский габбро-перидотитовый пояс был впервые описан в своей южной части как Александровско-Апостоловская структура [13, 16]. По структурному положению и геологическому строению он имеет определенное сходство с интрузиями габбро-перидотитовой формации в Верховцевской, Сурской и других зеленокаменных структурах. К отличительным особенностям Авдотьевско-Александровской структуры относятся отсутствие вулканогенных пород, значительная мощность, весьма слабая степень метаморфизма пород во внутренних частях интрузии, наличие хорошо выраженной расслоенности ультрамафитов и габброидов [15]. В геологическом разрезе Александровской структуры выделяются нижняя толща ультрамафитового и верхняя — габброидного состава. Последние магматические фазы представлены андезиновыми анортозитами, диоритами и плагиогранитоидами возрастом 3060 млн лет. Метаморфизм пород — от зеленосланцевой до амфиболитовой фации. Вмещающие породы представлены плагиомигматитами. В стратиграфической схеме УРМСК эта ультрамафит-мафитовая ассоциация выделяется как александровский комплекс [10]. На Александровском участке выявлены рудопроявления сульфидного никеля (Александровское, Владимировское, Солдатское), что определяет необходимость более детальных исследований.

**Методика.** Для изучения распределения петрогенных и рудных элементов в породах мафит-ультрамафитового комплекса были использованы результаты анализов редких и редкоземельных элементов, полученные с помощью метода масс-спектрокопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре *Elan 6100* в Центральной лаборатории Всероссийского геологического института. Состав сульфидов и минералов изучали в полированных шлифах и монофракциях на рентгеновском микроанализаторе *JXA-5* в Институте геохимии, минералогии и рудообразования им. Н. П. Семененко НАН Украины. Геохимические исследова-

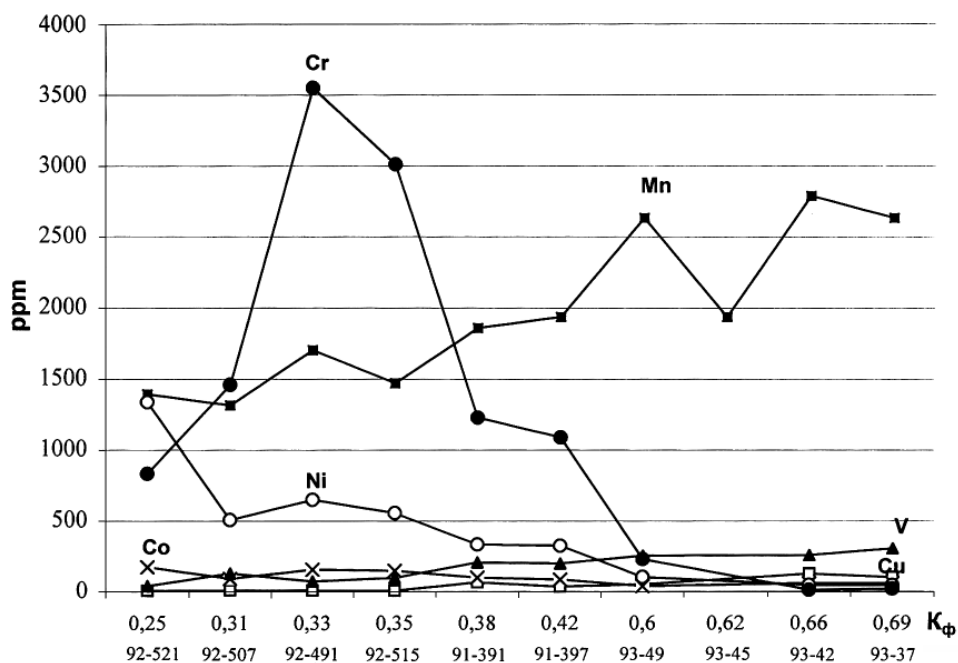


Рис. 1. График распределения рудных элементов в породах Александровской структуры (таблица): вебстерит — 91-391, 91-397, 92-507; лерцолит — 92-491, 92-515, 92-521; габбронорит — 93-42, 93-45; норит — 93-37, 93-49

ния ультрамафитов Александровской структуры выполнены по скв. 23292, 23293, 23232, 23239. Наиболее полный их разрез, представленный дунитами, лерцолитами и вебстеритами, задокументирован по скв. 23292 (гл. 378,0 м). Переходная зона от ультрабазитов к габброидам вскрыта скв. 23232 и представлена плагиоклазовыми вебстеритами. Породы расслоенного мафитового комплекса (габбро, габбронориты, нориты) изучены по скв. 23220, 23232. Они частично или полностью изменены в процессе низкотемпературного метаморфизма — амфиболитизации, уралитизации, окварцевания, серпентинизации.

**Результаты геохимических исследований.** Наиболее характерны для ультраосновных и основных пород Александровской структуры элементы группы железа — Ni, Cr, Co, Ti, V [15]. Их содержание коррелируется с магнезиальностью и железистостью пород (рис. 1). Для высокомагнезиальных разностей (дунитов, лерцолитов) характерно обогащение хромом. С увеличением железистости пород повышается содержание титана и ванадия. Никель и кобальт накапливаются не только в ультраосновных, но и в основных породах, только в значительно меньшем количестве.

**Хром.** В ультрамафитах Александровской структуры содержание хрома выше кларкового в полтора–два раза [5]. В лерцолитах и дунитах оно достигает 3010–3550 ppm [15]. В пироксенитах его концентрация заметно снижается (1090–1460 ppm), в габброидах установлено минимальное значение (11,3–228 ppm). В амфиболитизированных пироксенитах содержание хрома незначительно уменьшается. Это свидетельствует о том, что в процессе метасоматического преобразования ультрамафитов существенный вынос хрома за пределы интрузивных тел не происходит. Закономерности распределения хрома в ультрамафитах определяются содержанием и составом аксессуарной хромшпинели ( $Cr_2O_3$  — 12,00–20,54 %) и хроммагнетита ( $Cr_2O_3$  — 17,09), а также породообразующих минералов: оливина ( $Cr_2O_3$  — 0,02), клинопироксена ( $Cr_2O_3$  — 0,06–0,48), ортопироксена ( $Cr_2O_3$  — 0,09–0,24), амфибола

Результаты микрозондового анализа рудных минералов из тремолитов и окварцованных амфиболитов, %

Компонент Минерал Зерно	Тремолит, скв. 23293						Окварцованный амфиболит						
	обр. 7/2, гл. 210,0 м		обр. 7/4, гл. 208,8 м		обр. 7/1, скв. 23224, гл. 115,5 м		обр. 7/18, скв. 23224, гл. 117,0 м		обр. 7/24, скв. 23221, гл. 342,5 м				
	Рут	Pentl	Слр	Рут	Слр	Рут	Слр	Рут	Слр	Рут	Слр	Рут	Слр
Fe	60,12	29,38	31,11	60,56	31,21	59,55	60,21	30,99	60,90	60,57	31,47	31,05	60,56
Cu	0,00	0,01	34,17	0,01	34,42	0,01	0,00	34,73	0,03	0,00	34,26	34,42	0,01
Ni	0,18	31,78	0,04	0,26	0,00	0,20	0,26	0,01	0,08	0,25	0,01	0,05	0,25
Co	0,04	4,23	0,00	0,02	0,01	0,05	0,06	0,01	0,07	0,03	0,01	0,03	0,03
Ag	0,00	0,00	0,00	0,01	0,14	0,00	0,67	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
S	39,59	34,41	34,67	39,15	34,21	40,05	39,46	34,24	38,92	39,14	34,24	34,44	39,13
Сумма	99,43	100,01	99,99	100,01	99,99	99,86	100,66	100,01	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99

Примечание. Слр — халькопирит, Pentl — пентландит, Рут — пирротин.

(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,16–0,82 %). Минералы габброидов содержат очень незначительное количество хрома.

А. Я. Каневский [8] впервые рекомендовал использовать содержание ферросилитового компонента (Fs) в пироксенах для оценки хромитовости ультраосновных массивов. Содержание ферросилитового компонента в диопсидах лерцолитов Александровской структуры (4,37 %) сопоставимо с таковым в диопсидах ультрамафитовых хромитовых массивов Корякского нагорья — Тамватнейского (4,23) и Елистратовского (4,26 %). Содержание Fs в диопсидах вебстеритов Александровской структуры (8,15 %) сопоставимо с содержанием Fs в таковых массива Средний Кратака Южного Урала (7,92 %) [8]. Эти данные позволяют положительно оценивать перспективы Александровской структуры на хромитовость. В то же время, согласно критериям С. В. Москалевой [12], породы дунит-перидотит-пироксенит-габбровой формации, к которой принадлежит Авдотьевско-Александровская интрузия, не являются промышленно хромитовыми (содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в хромшпинелидах ультрамафитов Александровской структуры меньше 40 % (до 20,54), а отношение Cr/Fe меньше 3 (от 0,64 до 0,87)).

*Никель, кобальт.* Медно-никелевые руды, выявленные скв. 23254, 23293, 23311, 23315, содержат парагенетическую ассоциацию рудных минералов — пирротин, пентландит, халькопирит. Мощность рудных тел от 0,3 до 14,0 м с содержанием никеля от 0,226 до 3,9 %. Среднее содержание по Александровскому рудопроявлению составляет, %: Ni — 0,226–0,542, Cu — 0,13–0,31, Co — 0,034–0,053. Главным концентратом никеля служит пентландит. Он представлен в основном ксеноморфными зернами кремово-белого цвета с четко выраженной октаэдрической слайностью и встречается, как правило, в сплошных пирротиновых агрегатах [7].

Пентландит из тремолитов скв. 23293, гл. 210,0 м содержит, %: Fe — 29,47–29,58, Ni — 31,66–33,78, S — 34,28–34,41, примеси меди (0,01) и кобальта (4,21–4,23). Никель присутствует и в пирротине (Fe — 60,12–60,56 %, S — 39,04–39,59, Ni — 0,18–0,26, примеси кобальта (0,04–0,06), серебра (0,01), меди (0,01 %)) (таблица).

Никель и кобальт также входят в состав породообразующих силикатов, главным образом оливина (NiO — 0,13–0,55 %). Содержание никеля в оливине возрастает с увеличением его магнетиальности. Изученные оливины ультрабазитов Александровской структуры сопоставимы с оливинами никеленосных ультрабазитов Алларечинского района Кольского п-ова (NiO — до 0,34 %) [19].

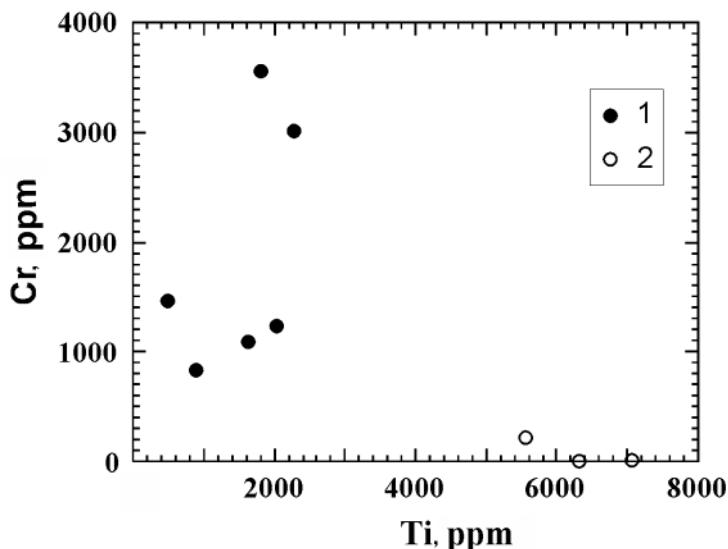


Рис. 2. Диаграмма Ti – Cr: 1 – ультрамафиты, 2 – мафиты

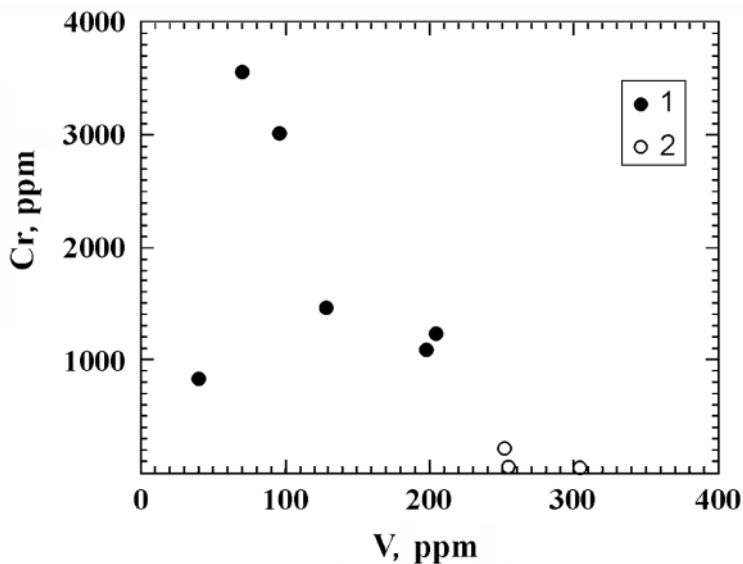


Рис. 3. Диаграмма V – Cr: 1 – ультрамафиты, 2 – мафиты

Максимальная концентрация никеля и кобальта определена в лерцолите (Ni – 555–1340, Co – 145–173 ppm). Для пироксенитов характерно содержание Ni – 324–507, Co – 83,0–97,0 ppm. В габброидах концентрация этих элементов минимальна (Ni – 42,3–102, Co – 37,2–58,0 ppm). Все породы отличаются преобладанием никеля над кобальтом. Отношение Ni/Co закономерно снижается от перидотитов (4,18–7,75) и пироксенитов (3,42–5,58) к габброидам (0,72–2,74).

**Титан, ванадий.** В дунитах, лерцолитах и пироксенитах содержание V превышает кларковое в пять раз, а в габброидах – в полтора раза [5]. Наблюдается последовательное возрастание концентрации ванадия и титана от ультрамафитов (V – 39,7–204, Ti – 779,35–2997,5 ppm) к мафитам (V – 252–304, Ti – 4076,6–7074,1 ppm)[15] (рис. 2, 3). Максимальный уровень накопления этих элементов характерен для мафитов. Распределение титана и ванадия в исследуемых породах обратно закономерности распределения хрома (диаграммы Ti – Cr, V – Cr, рис. 2, 3). Анализ распределения Ti по минералам показывает, что он концентрируется главным

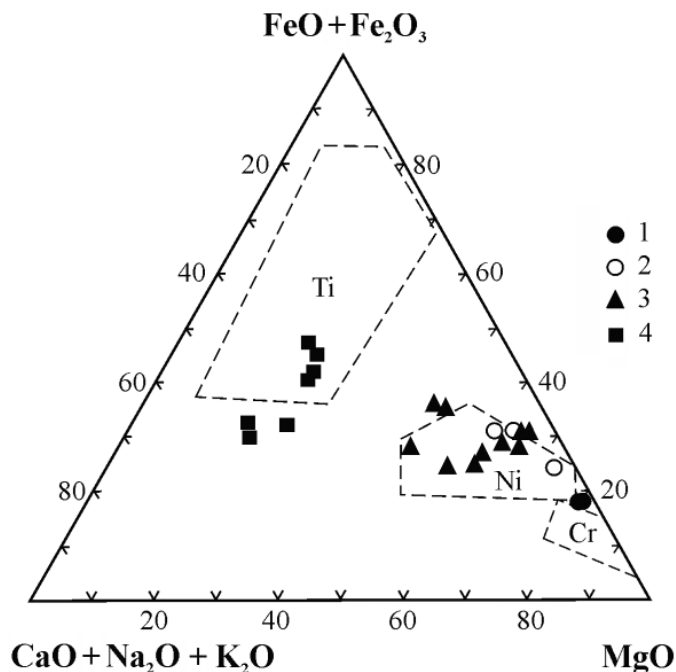


Рис. 4. Металлогеническая диаграмма А. И. Богачева [2] для интрузивных пород Александровской структуры с контурами хромито-, никеле- и титаноносных интрузий: 1 — дуниты, 2 — лерцолиты, 3 — вебстериты, 4 — габброиды

образом в хроммагнетите ( $\text{TiO}_2$  — 2,11 %) и титанистом магнетите ( $\text{TiO}_2$  — 3,2 %). Из породообразующих силикатов наиболее насыщены титаном орто- ( $\text{TiO}_2$  — 0,06–0,85), клинопироксены ( $\text{TiO}_2$  — 0,09–0,53) и амфиболы ( $\text{TiO}_2$  — 0,05–0,99 %). В меньшей мере обогащены этим элементом оливин и акцессорная шпинель. Характер распределения ванадия в минералах ультрамафитов свидетельствует о его преимущественной приуроченности к окиснорудным соединениям, главным образом к титанистому магнетиту ( $\text{V}_2\text{O}_5$  — 0,18 %). Отмечается содержание этого элемента и в хромшпинелидах ( $\text{V}_2\text{O}_5$  — 0,03–0,1 %). Часть ванадия входит в породообразующие силикаты ультрамафитов и мафитов — оливин, пироксен, амфибол, плагиоклаз.

**Медь, цинк, свинец.** В ультрамафитах установлено, ppm: Zn — 108–170, Cu — 5–63,8, Pb — 1,4–5,98; в габброидах: Zn — 55,6–70,2, Cu — 50,2–124, Pb — < 1 [15]. Согласно этим данным, цинк преобладает над медью во всех разновидностях ультраосновных пород. Эти рудные элементы входят также в структуры всех породообразующих минералов, но поскольку для них характерно геохимическое сродство с серой, то подавляющая их часть заключена в сульфидах. Медь представлена собственным минералом — халькопиритом (Cu — 34,34–34,42 %) (таблица). Ультрамафиты характеризуются сверхкларковым содержанием Zn (в семь раз), а габброиды — Cu (в пять раз) [5].

**Выводы.** Рудные минералы в ультрамафитах и мафитах Александровской структуры представлены хромшпинелидами, хроммагнетитом, титанистым магнетитом, ильменитом, халькопиритом, пентландитом, пирротинном. По отношению к объему породы содержание рудных минералов изменяется от единичных зерен до 1–10 %. Идиоморфная и аллотриоморфнозернистая масса рудной составляющей распределяется в виде рассеянной вкрапленности и прожилково-вкрапленных выделений. Перидотитам и пироксенитам характерен хромшпинелид-магнетитовый тип акцессорной рудной минерализации и редкая сульфидная вкрапленность, представленная пентландитом и пирротинном (таблица). В габброидах и их мета-

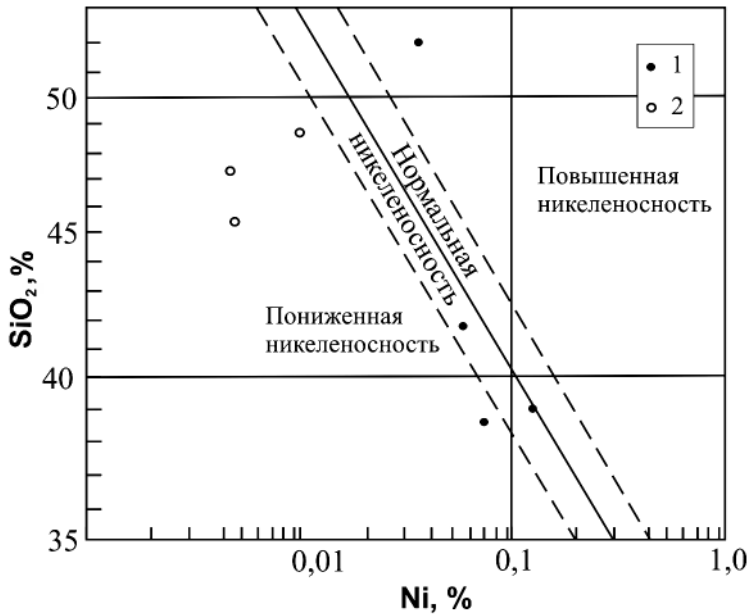


Рис. 5. Диаграмма никеленосности ультраосновных и основных пород Александровской структуры [5]: 1 – ультрамафиты, 2 – мафиты

морфических аналогах выделяются ильменит, халькопирит, пирротин. Эти минералы встречаются в виде изометричной и неправильной по форме вкрапленности, расположенной в интерстициях породообразующих минералов. Присутствуют рудные вкрапления в зернах пироксена, амфибола и плагиоклаза. Преобладающая часть пирротина приурочена к трещинам в породе, где он образует выделения неправильной формы, извилистые мономинеральные прожилки. Второстепенная роль принадлежит вкрапленности пирротина. К характерным примесям в пирротине относятся кобальт (до 0,06), никель (до 0,26) и серебро (до 0,01 %) (таблица).

Сравним полученные геохимические данные с показателями благоприятных условий формирования сульфидных медно-никелевых руд, которые определил А. И. Богачев [2] для заведомо никеленосных интрузий  $(MgO/(FeO + Fe_2O_3)) = 15-50 : 6-16$ , что соответствует значениям  $M : F = 2,0-3,5$  при содержании  $(CaO + Na_2O + K_2O)$  от 3 до 15 %. Для некоторых образцов ультрамафитов Александровской структуры  $M : F = 1,31-4,54$  при  $CaO + Na_2O + K_2O = 0,95-10,54$ , что позволяет сделать вывод об их никеленосности. На металлогенической диаграмме  $(CaO + Na_2O + K_2O) - MgO - (FeO + Fe_2O_3)$  образцы дунитов попали в поле хромитоносных, а часть образцов габброидов – в поле титаноносных интрузий (рис. 4). Согласно диаграмме  $Ni - SiO_2$  (рис. 5), точки состава ультрамафитов расположились в поле пород нормальной и повышенной (обр. 91-391, скв. 23232) никеленосности. Габброиды попали в поле пониженной никеленосности.

Низкое значение отношения  $Ni/Co$  (от 1 до 8), высокое (от 100 ppm) содержание меди (обр. 93-37, 93-42), высокое значение отношения  $Cu/Ni$  (от 0,05 до 3), повышенная железистость пород ( $> 20\%$ ), коэффициент окисления  $O = Fe^{3+}/Fe^{2+} < 0,1$  – эти геохимические признаки указывают на концентрацию никеля, кобальта, меди в сульфидных минералах.

1. Бобров А. Б. К вопросу о расчленении комплекса основных и ультраосновных пород Среднего Приднепровья // Геол. журн. – 1992. – № 6. – С. 52–58.
2. Богачев А. И. Некоторые петрохимические особенности никеленосных, титаноносных и хромитоносных интрузий // Тр. Ин-та геологии Карел. фил. АН СССР. – 1967. – Вып. 1. – С. 251–264.
3. Бурицева З. А., Ильвицкий М. М., Колбанцев Р. В. и др. Геохимические особенности ультраосновных и основных комплексов Украинского щита (в связи с их никеленосностью). – Л.: Недра, 1976. – 153 с.
4. Веригин М. И. Петрохимия и металлогенность ультраосновных пород Среднеприднепровского ме-

- габлока // Геохимия и рудообразование. — 1976. — Вып. 5. — С. 25–34.
5. *Виноградов А. П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. — 1962. — № 7. — С. 555–571.
  6. *Зеленокаменные* пояса фундамента Восточно-Европейской платформы (геология и петрология вулканитов). / Отв. ред. С. Б. Лобач-Жученко. — Л.: Наука, 1988. — 215 с.
  7. *Змиевский Г. Е.* Геологическое строение и геодинамика Токовской площади: Отчет поисково-съемочного отряда о результатах глубинного геологического картирования м-ба 1 : 50000 в пределах листов L-36-8-B, Г (южные половины), L-36-20-A, Б, проведенного в 1989–1993 гг. — Днепропетровск: Южукргеология, 1994.
  8. *Каневский А. Я.* Породообразующие пироксены ультрамафитовых хромитоносных массивов типа А (Украина, Россия, Казахстан) // Геол. журн. — 2007. — № 4. — С. 74–84.
  9. *Конди К.* Архейские зеленокаменные пояса: Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 390 с. — (Сер. "Науки о Земле"; Т. 85).
  10. *Кореляційна* хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита (схема та поясн. зап.). — К.: УкрДГРІ, 2004. — 30 с.
  11. *Метабазитовые* и кератофировые алюмосиликатные формации центральной части Украинского щита / Под ред. Н. П. Семененко. — Киев: Наук. думка, 1982. — 368 с.
  12. *Москалева С. В.* Гипербазиты и их хромитоносность. — Л.: Недра, 1974. — 270 с.
  13. *Наливкина Э. Б.* Офиолитовые ассоциации раннего докембрия. — М.: Недра, 1977. — 183 с.
  14. *Рябоконь С. М., Гаева Н. М.* Рудные минералы и зоны их проявлений в осадочно-вулканогенных породах Среднего Приднепровья // Геохимия и рудообразование. — 1976. — Вып. 5. — С. 19–25.
  15. *Самборская И. А., Артеменко Г. В.* Геохимия архейских ультрамафитов Александровской структуры (Среднеприднепровский мегаблок УЩ) // Пошук. та екол. геохімія. — 2007. — № 1 (6). — С. 21–27.
  16. *Семененко Н. П., Бойко В. Л., Бордунов И. Н. и др.* Ультрабазитовые формации центральной части Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 1979. — 412 с.
  17. *Стульчиков В. А.* Никеленосность ультраосновных пород зеленокаменных поясов Среднего Приднепровья // Геохимия и рудообразование. — 1992. — Вып. 19. — С. 57–69.
  18. *Стульчиков В. О., Гловайська С. В., Шаркін О. П.* Породоутворюючі мінерали і нікеленосність ультраосновних порід Верхівцевського району Українського щита // Допов. АН УРСР. Сер. Б. — 1989. — № 4. — С. 19–22.

Ин-т геохимии, минералогии и рудообразования  
им. Н. П. Семененко НАН Украины, Киев  
КГСЦ, Кривой Рог

Поступила 14.12.2007

**РЕЗЮМЕ.** Ультрамафітам Олександрівської структури властива нормальна і підвищена нікеленосність. Максимальний рівень накопичення ванадію і титану спостережений у габроїдах. За геохімічними ознаками у сульфідних мінералах концентрувались нікель, кобальт і мідь. Мідно-нікелеві руди характеризуються стійкою парагенетичною асоціацією — піротин, пентландит, халькопірит.

**SUMMARY.** Ultramaфites of Alexandrovka structure are characterised by normal and higher nickel content. Maximum level of vanadium and titanium accumulation are observed in gabbroides. The sulfide minerals have geochemical characteristics that point to the concentration of nickel, cobalt and copper in them. The singenetic copper-nickel ores are characterised by stable paragenetic association — pyrrhotine, pentlandite, chalcopyrite.