

Мафит-ультрамафитовый магматизм без металлов платиновой группы и их содержащих: тектоно-петрологические и глобальные мантийные причины явления

Рудные месторождения, ассоциирующие с мафит-ультрамафитовым мантийным магматизмом, включают в свой состав сульфидные медно-никелевые месторождения, в ряде случаев содержащие платиноиды (PGE = ПГЭ-платиновая группа элементов) – но не всегда (или в незначительных количествах). Причины такого различия в мафит-ультрамафитовом магматизме чаще всего не рассматриваются, но тектоно-петрологическое понимание данного явления требует объяснения, как с научной точки зрения, так и в экономических целях, тем более, что такие месторождения имеют стратегическое значение. В предлагаемой работе делается попытка петролого-тектонического и изотопно-геохимического объяснения причин возможного отсутствия элементов платиновой группы для сульфидных Cu-Ni ± PGE месторождений.

Ключевые слова: докембрийские сульфидные Cu-Ni ± PGE месторождения, мафит-ультрамафитовый мантийный магматизм.

S. I. TURCHENKO (IPGG RAS)

Mafic-ultramafic magmatism without PGE and with them: tectonic petrologic and global mantle causes of such phenomenon

Ore deposits related with mafic-ultramafic mantle magmatism contain sulfide Cu-Ni ± PGE deposits, but in many cases without PGE. Reasons for such a difference in mafic-ultramafic mantle magmatism are most often not studied, but tectonic petrological understanding of this phenomenon requires explanation, both from a scientific point of view and for economic purposes, particularly since such deposits are of strategic importance. In the proposed paper, an attempt is made to provide a petrological tectonic and isotope geochemical explanation of the reasons for possible lack of platinum group elements for sulfide Cu-Ni ± PGE deposits.

Keywords: Precambrian sulfide Cu-Ni ± PGE deposits, mafic-ultramafic mantle magmatism.

Для цитирования: Турченко С. И. Мафит-ультрамафитовый магматизм без металлов платиновой группы и их содержащих: тектоно-петрологические и глобальные мантийные причины явления // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 91. – С. 97–101. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_91_97-101

Введение. Сульфидные медно-никелевые месторождения, образованные в докембрийских геоструктурных областях, часто обладают платинометалльными запасами, но во многих случаях в таких месторождениях резервы платиноидов незначительны или отсутствуют вовсе. Для разведки и оценки содержания металлов платиновой группы (МПГ или PGE) в мафит-ультрамафитовых интрузиях важно установить причины такой дифференциации. Приведем в качестве примера неопротерозойский Центрально-Азиатский орогенический пояс (ЦАОП) [3], в восточной части которого, расположенной в КНР, известны две группы мафит-ультрамафитовых интрузий с сульфидными Cu-Ni месторождениями. Одна из них – группа месторождений Хонг-Квиллинг, – не имеет платинометалльной минерализации, тогда как другая группа интрузий, приблизительно одновозрастных с первой, обладает достаточно

крупными содержаниями платиноидов в сульфидных Cu-Ni рудах на месторождении Жинчюан. Обе группы интрузий связаны с мезозойским возрастом мантийной активизации в этом регионе ЦАОП, что подтверждается геологическими наблюдениями китайских исследователей [16], но не объясняет причин резкого различия в характере платинометалльной минерализации, которое часто наблюдается и в других докембрийских сульфидно-никелевых месторождениях. В предлагаемой работе сделана попытка объяснить причины такого расхождения в содержании платиноидов с точки зрения петролого-геохимической и глобально-тектонической.

Материалы и результаты обсуждения. Некоторые исследователи связывали отсутствие платинометалльной минерализации с тем, что ее не было в сульфидном расплаве, как части силикатной магмы, до внедрения мафит-ультрама-

фитовых интрузий [13]. Это можно представить как частный случай типичной картины для сульфидных Cu-Ni месторождений докембрийских областей, например, в Западной Австралии [15]. Если такое явление наблюдается, то оно может быть связано с незначительным МПГ содержанием в мантии региона исследований. Альтернатива такому объяснению отсутствия платинометалльной минерализации в мантийно-произведенных магмах – сохранение МПГ в мантийном источнике из-за низкой степени парциального плавления мантии. Некоторые исследователи считали, что в легкоплавких сульфидах такие МПГ, как Pt и Pd, могли отсутствовать или наличествовали только другие минеральные формы, например, тугоплавкие Os-Ir или RuS_2 соединения [4]. Поэтому влияние парциального плавления мантии на содержание МПГ в инициальных магмах контролировалось не только содержаниями платиноидов в мантии региона, но и минеральным составом платиноидов. Только сочетание обоих факторов – количества платиноидов в мантии региона и пропорций разных минеральных элементов платиноидов в мантийных источниках региона – может объяснить различия в концентрации платиноидов в мантийно-произведенных магмах. Но такое объяснение недостаточно. В некоторых ситуациях, например, для рудного района или небольшой области, оно удовлетворительно, но может оказаться ошибочным при сравнении мафит-ультрамафитовых интрузий из различных геолого-тектонических позиций. Так, например, Б. Ли [7], изучив характер платинометалльного рудообразования и эволюцию мафит-ультрамафитового магматизма в китайской части ЦАОП (Хинган-Монгольский орогенический пояс), пришел к выводу, что формирование платиноносного магматизма произошло при 20 % парциальном плавлении мантии. Сравнив этот результат с заключением [14] относительно крупного сульфидно-никелевого и платинометалльного месторождения Жинчуан о формировании мафит-ультрамафитового магматизма при 25 % парциальном плавлении мантии, можно в целом прийти к выводу, что парциальное плавление мантии не является основополагающим фактором образования платиновой минерализации для мафит-ультрамафитового магматизма. Хотя расхождения в проценте парциального плавления мантии для двух разных по масштабам месторождений кажутся незначительными, но именно в этом и заключается их существенное различие. Более того, оказывается, что для этих двух месторождений существует небольшое расхождение и в возрасте. Логично предположить, что мантийная возрастная эволюция может также быть существенным фактором генезиса платинометалльного оруденения. Намечается явная тенденция к уменьшению содержания платиноидов в мантийных мафит-ультрамафитовых породах в зависимости от их возраста (таблица). Таблица показывает, что содержание платиноидов в месторождениях в среднем повышается с увеличением возраста

месторождений (рисунок), что можно объяснить последовательной экстракцией платиноидов из расплавов при парциальном плавлении мантии, особенно если платиноиды присутствовали в виде легкоплавких сульфидов. Это особенно заметно, если мантия подвергалась неоднократному парциальному плавлению или выплавлению ультрамафитов, что давало все меньшее количество платиноидов в более поздних выплавках, а, значит, и в более поздних месторождениях. Таким образом, геохимический тип мантии (обедненная или обогащенная) также явился одним из факторов специализации ультрамафитовых интрузий на платинометалльное оруденение. Геохимический мантийный тип был изучен на основе изучения изотопных составов Nd и Sr в базальтах срединно-океанических хребтов. Исследования показали, что такие базальты ведут свое происхождение из глубинных источников с более высокими отношениями Sm/Nd и более низкими отношениями Rb/Sr по сравнению с хондритовым резервуаром [2, раздел 13.2]. Такие породные источники называют «обедненными», так как они, по-видимому, теряют Rb и другие литофильные компоненты, в том числе и легкие платиноидные элементы (Os, Re, Ir) при парциальном плавлении отдельных участков мантии. Однако в участках мантии существуют также «обогащенные» источники магматических пород, которые имеют более высокие отношения Rb/Sr и более низкие отношения Sm/Nd, а также более высокое содержание тяжелых сидерофильных платиноидов (Pt, Pd, Rh), чем во всем объеме мантии Земли. Явное присутствие в мантии двух типов источников магм дало повод предположить, что присутствие или отсутствие платиноидной минерализации в сульфидных Cu-Ni месторождениях является следствием смешения магм, ведущих свое происхождение из этих двух источников. Исследования геохимии МПГ обеспечили перспективы изучения мантии, ее типов и взаимодействия мантии и коры. У таких элементов, как МПГ: Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd и Re – имеется сильное сродство этих металлов к сульфидам относительно силикатов мантии. Эти элементы также обладают переменным поведением, разделяющимся между очень совместимыми Os, Ir, Ru и Rh, относительно совместимыми Pt и Pd и умеренно несовместимым Re во время процессов плавления и кристаллизации [5]. Такие геохимические свойства в комбинации с долгоживущими $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$ и $^{190}\text{Pt}/^{186}\text{Os}$ системами делают эти элементы своеобразными трассерами ультрамафитовых магм по их происхождению из различных типов мантийных выплавов. У. Майер и Д. Гровс [9] пришли к выводу, что образование МПГ в месторождениях контролируется возрастными и литосферными факторами (типом мантии). Можно полагать, что геохимическая природа мантии дополнительно влияет на концентрацию МПГ в сульфидных Cu-Ni ± PGE месторождениях через мантийный тип (обогащенная или обедненная мантия), из которого происходили мафит-ультрамафитовые

Возраст месторождений, среднее содержание платиноидов (МПП) в рудах и геохимический тип мантии (месторождения пронумерованы для корреляции с рисунком и ранжированы по удревнению возраста)

Месторождение, страна	Среднее содержание МПП, ppm	Возраст, млрд лет	Тип мантии (геохимический)
1. Игл Несет, Канада	4,70	2,77	Обедненная
2. Бёрд Ривер, Канада	1,76	2,74	Не установлен
3. Камбалда, Австралия	1,13	2,70	Обедненная
4. Лак дес Илс, Канада	1,85	2,70	Обедненная
5. Мунни Мунни, Австралия	2,90	2,70	Обогащенная
6. Великая Дайка, Зимбабве	5,42	2,59	Обогащенная
7. Портимо, Финляндия	1,92	2,44	Обогащенная
8. Койтилайнен, Финляндия	1,0	2,44	Обедненная
9. Кейвица, Финляндия	0,60	2,06	Не установлен
10. Бушвельд, ЮАР	5,67	2,05	Обогащенная
11. Томпсон, Канада	0,83	1,90	Обедненная
12. Раглан, Канада	3,76	1,90	Обедненная
13. Садбери, Канада	1,17	1,84	Обогащенная
14. Войсис Бэй, Канада	1,19	1,32	Обедненная
15. Дулут, США	0,66	1,10	Обогащенная
16. Игл, США	1,20	1,10	Обогащенная

породы и месторождения с МПП. Это можно проследить на примере сульфидных Cu-Ni месторождений КНР в ЦАОП, в котором два месторождения принадлежат к единой мезозойской эре активизации. Тектонические исследования китайских геологов показали, что платиноносное месторождение Жинчуан было сформировано в континентально-рифтовой обстановке, в то время как сульфидно-никелевые месторождения без платиноидной минерализации – образованы в обстановке коллизионного орогена [12], где мафит-ультрамафитовый магматизм был произведен из различного геохимического типа мантийного источника. Магмы для месторождения Жинчуан были выплавлены из обогащенной мантии [6; 8], в то время как магмы группы сульфидных Cu-Ni месторождений, не обладающие платинометальной минерализацией, были связаны с обедненной мантией [17; 18]. На основе этих фактов можно полагать, что тип мантии (обогащенная или обедненная) является одним из критических факторов, которые контролируют платинометальную минерализацию в магматических сульфидных Cu-NI-PGE месторождениях.

Можно также сделать вывод, что при эволюции мантии большие пропорции платиноидов, которые присутствовали в качестве компонентов в составе легкоплавких платинометальных сульфидов, были экстрагированы из мантии, но частично соединения платиноидов были также сохранены в остаточной мантии. Если по каким-либо причинам не происходило добавление платиноидов в мантию, то магмы из

остаточных мантийных парциальных плавлений, естественно, содержали их меньше. Поэтому более поздние по времени сульфидные Cu-Ni мафит-ультрамафитовые месторождения иногда вовсе не включают в себя платинометальной минерализации. В других случаях молодые пермь-триасовые Cu-NI-PGE месторождения содержат богатые платиноидные ресурсы, например, руды месторождения Норильск-Талнах, где одноактное мантийное парциальное плавление способствовало образованию ультрамафитовых пород из обогащенной мантии [10].

Конечно, процессы, ведущие к обогащению верхней мантии платиноидами, не очень ясны –

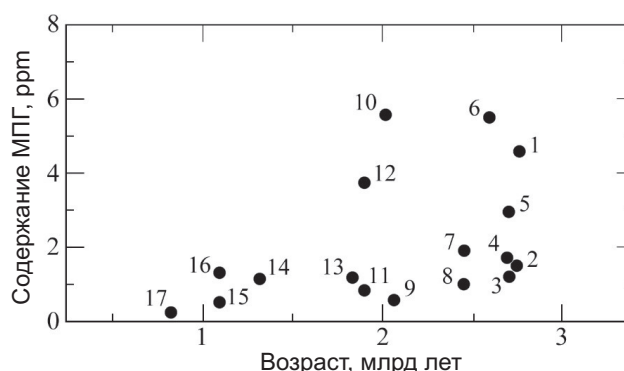


Рис. Корреляция средних содержаний МПП (в ppm из таблицы) в сульфидных рудах Cu-Ni ± PGE месторождений в отношении к их возрасту (млрд лет), которые приведены в таблице. Цифры означают названия месторождений, показанных в таблице

мантийное обогащение может происходить при коровой ассимиляции, до-субдукционном изменении океанических пород, восхождении новых порций магм, флюидов или летучих компонентов. Но все же коровая ассимиляция не может дополнительно доставить платиноидный материал, поскольку кора не так уж богата платиноидами [1; 9], а реальными агентами доставки платиноидов могут быть мобильные флюиды из глубинной мантии.

Заключение. 1. Мафит-ультрамафитовые интрузии с сульфидными Cu-Ni месторождениями, не несущими платинометалльного оруденения, были генерированы при неоднократном парциальном плавлении обедненной мантии.

2. Существуют причинные связи между обедненными или обогащенными платиноидами сульфидных Cu-Ni месторождений, геохимической природой и возрастной эволюцией мантии. С возрастным развитием мантии легкоплавкие пропорции платиноидов могли быть экстрагированы из мантии при ее раннем парциальном плавлении. В остаточных порциях мантии сохраняется меньшая часть платиноидов, которые могли быть извлечены из нее в менее богатые платиноидами руды при последующем мантийном плавлении.

3. Возраст мафит-ультрамафитовых интрузий и геохимический тип (обедненная или обогащенная) мантии, из которой были произведены интрузии, могут быть индикаторами оценки платинометалльного потенциала таких интрузий. Разведка и поиски магматических сульфидных Cu-Ni месторождений, обогащенных платиноидами, могут быть более успешными, если они направлены на области, где известно существование древних мафит-ультрамафитовых интрузий и приуроченных к ним сульфидно-никелевых месторождений. Меньший успех сулят поиски, сосредоточенные в районах распространения месторождений ультрамафитовых формаций более молодого возраста, особенно если те имеют магматическое происхождение из обедненной мантии и подвергались неоднократному парциальному мантийному плавлению.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР FMUW-2022-0004.

6. Jiang C. Y. et al. Comparison of host magmatic sulfide and oxide deposits of mafic-ultramafic intrusions and review the mineralizing processes / C. Y. Jiang, Z. D. Xia, J. L. Ling, M. Z. Xia, R. H. Lu, F. F. Guo // *Acta Petrol. Sinise.* – 2011. – Vol. 27. – Pp. 3005–3020.

7. Li B. Q. Study on Quantative Modeling of Trace Elements in Magmatic Processes and its Application. (Master thesis). – 2013. – Jilin University. Changchun. (In Chinese with English abstract).

8. Li X. H. et al. SRIMP U-Pb zircon age of Junchuan ultramafic intrusion and its geological significance / X. H. Li, I. Su, B. Song, D. Y. Liu // *Chin. Sci. Bull.* – 2004. – Vol. 49. – Pp. 420–422.

9. Maier W. D., Groves D. I. Temporal and spatial controls on the formations of magmatic PGE and Ni-Cu deposits. // *Miner. Deposita.* – 2011. – Vol. 46. – Pp. 841–857.

10. Naldrett A. J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in the genesis. // *Miner. Deposita.* – 1999. – Vol. 34. – Pp. 227–240.

11. Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. – Springer, Heidelberg, 2004. – 378 p.

12. Pirajno E. et al. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny / E. Pirajno, R. E. Ernst, A. S. Borisenko, G. Fedoseev, E. A. Naumov // *Ore Geol. Rev.* – 2009. – Vol. 35. – Pp. 114–136.

13. Su S. G. et al. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China / S. G. Su, C. S. Li, M. F. Shou, E. M. Ripley, L. Qi // *Miner. Deposita.* – 2008. – Vol. 43. – Pp. 609–622.

14. Sun H. et al. Constraint of mantle partial melting on PGE mineralization of mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan: case study on Tulargen and Xiangshang Cu-Ni deposits / H. Sun, K. Z. Qin, J. X. Li, D. M. Tang, X. Fan, Q. H. Xiao // *Acta Petrol. Sin.* – 2008. – Vol. 24. – Pp. 1079–1086. (In Chinese with English abstract).

15. Sun S.-S. et al. Use of geochemistry as a guide to platinum group element potential of mafic-ultramafic rocks: examples from the west Pilbara Block and Halls Creek Mobile Zone, Western Australia / S.-S. Sun, D. A. Wallace, D. M. Hoatson, A. Y. Glikson, R. R. Keays // *Precambrian Research.* – 1991. – Vol. 50. – Pp. 1–35.

16. Wang J. M. et al. Geology and genesis of the Shou'an PGE-Cu-Ni deposit, Henan province / J. M. Wang, Y. J. Chen, S. I. Li, G. M. Wang, M. Mi // *J. Mineral. Petrol.* – 2013. – Vol. 26. – Pp. 31–37. (In Chinese with English abstract).

17. Wei B. et al. Origin of PGE-depleted Ni-Cu sulfide mineralization in the Triassic Hongquiling No7 orthopyroxenite intrusion, central Asian orogenic belt, northeastern China / B. Wei, C. Y. Wang, C. Li, Y. Sun // *Econ. Geol.* – 2013. – Vol. 108. – Pp. 1813–1831.

18. Zhang G. L., Wu F. Y. Geochronology significance of the post-orogenic mafic-ultramafic rocks in Hongquiling area of Jinlin province, NE China // *Seismol. Geol.* – 2005. – Vol. 27. – Pp. 600–608. (In Chinese with English abstract).

1. Тейлор С. М., Мак-Леннан С. Р. Континентальная кора et состав и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 380 с.

2. Фор Г. Основы изотопной геологии. Раздел 13-1. Мантийная последовательность. – М.: Мир, 1989. – 590 с.

3. Ярмолук В. В., Козловский А. М., Лебедев В. И. Неoproterozoические магматические комплексы Сонгинского блока (Монголия): к проблеме образования и корреляции докембрийских террейнов Центрально-Азиатского орогенного пояса // *Петрология.* – 2017. – № 4. – С. 362–394.

4. Barnes S. J., Naldrett A. J., Corton M. P. The origin of fractionation of platinum group elements in terrestrial magmas // *Chem. Geol.* – 1985. – Vol. 53. – Pp. 303–323.

5. James M. D. Hotspot volcanism and highly siderophile elements // *Chem. Geol.* – 2013. – Vol. 341. – Pp. 50–74.

1. Taylor S. R., McLennan S. M. The Continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific, Oxford, 1985, 312 p.

2. Faure G. Principles Isotope geology. Moscow, World, 1989, 590 p.

3. Yarmoluk V. V., Kozlovsky A. M., Lebedev V. I. Neoproterozoic magmatic complexes Songin block (Mongolia): to problem of formation and correlation Precambrian terrains of Central-Asian orogenic belt. *Petrology*, 2017, no. 4, pp. 362–394. (In Russian).

4. Barnes S. J., Naldrett A. J., Corton M. P. The origin of fractionation of platinum group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.*, 1985, vol. 53, pp. 303–323.

5. James M. D. Hotspot volcanism and highly siderophile elements. *Chem. Geol.*, 2013, vol. 341, pp. 50–74.

6. Jiang C. Y., Xia Z. D., Ling J. L., Xia M. Z., Lu R. H., Guo F. F. Comparison of host magmatic sulfide and oxide deposits of mafic-ultramafic intrusions and review the mineralizing processes. *Acta Petrol. Sinise*, 2011, vol. 27, pp. 3005–3020.
7. Li B. Q. Study on Quantative Modeling of Trace Elements in Magmatic Processes and its Application. (Master thesis), 2013, Jilin University, Changchun. (In Chinese with English abstract).
8. Li X. H., Su I. Song B., Liu D. Y. SRIMP U-Pb zircon age of Junchuan ultramafic intrusion and its geological significance. *Chin. Sci. Bull*, 2004, vol. 49, pp. 420–422.
9. Maier W. D., Groves D. I. Temporal and spatial controls on the formations of magmatic PGE and Ni-Cu deposits. *Miner. Deposita*, 2011, vol. 46, pp. 841–857.
10. Naldrett A. J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in the genesis. *Miner. Deposita*, 1999, vol. 34, pp. 227–240.
11. Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. Springer, Heidelberg, 2004, 378 p.
12. Pirajno E., Ernst R. E., Borisenko A. S., Fedoseev G., Naumov E. A. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny. *Ore Geol. Rev.*, 2009, vol. 35, pp. 114–136.
13. Su S. G., Li C. S., Shou M. F., Ripley E. M., Qi L. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China. *Miner. Deposita*, 2008, vol. 43, pp. 609–622.
14. Sun H., Qin K. Z., Li J. X., Tang D. M., Fan X., Xiao Q. H. Constraint of mantle partial melting on PGE mineralization of mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan: case study on Tulargen and Xiangshang Cu-Ni deposits. *Acta Petrol. Sin.*, 2008, vol. 24, pp. 1079–1086. (In Chinese with English abstract).
15. Sun S.-S., Wallace D. A., Hoatson D. M., Glikson A. Y., Keays R. R. Use of geochemistry as a guide to platinum group element potential of mafic-ultramafic rocks: examples from the west Pilbara Block and Halls Creek Mobile Zone, Western Australia. *Precambrian Research*, 1991, vol. 50, pp. 1–35.
16. Wang J. M., Chen Y. J., Li S. I., Wang G. M., Mi M. Geology and genesis of the Shou’an PGE-Cu-Ni deposit, Henan province. *J. Mineral. Petrol.*, 2013, vol. 26, pp. 31–37. (In Chinese with English abstract).
17. Wei B., Wang C. Y., Li C., Sun Y. Origin of PGE-depleted Ni-Cu sulfide mineralization in the Triassic Hongquiling No7 orthopyroxenite intrusion, central Asian orogenic belt, northeastern China. *Econ. Geol.*, 2013, vol. 108, pp. 1813–1831.
18. Zhang G. L., Wu F. Y. Geochronology significance of the post-orogenic mafic-ultramafic rocks in Hongquiling area of Jinlin province, NE China. *Seismol. Geol.*, 2005, vol. 27, pp. 600–608. (In Chinese with English abstract).

Турченко Станислав Иванович – доктор геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник, Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук (ИГГД РАН). Наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199034. <turchsi@mail.ru>

Turchenko Stanislav Ivanovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences (IPGG RAS). 2 Naberezhnaya Makarova, St. Petersburg, Russia, 199034. <turchsi@mail.ru>