

## Особенности формирования сульфидно-никелевых и платиноносных (Ni-МПГ) руд в архейских провинциях

Наиболее важная и актуальная проблема геолого-минералогических исследований в XXI в. — особенности формирования Ni-МПГ сульфидных руд в мантийных породах и вмещающих их субстратах и их тектоническое положение. Сульфидные руды обычно принадлежат к мафит-ультрамафитовым породным ассоциациям, сформированным в обстановках континентального рифтогенеза, которые способствуют быстрой доставке мантийных магм в земную кору. В результате рифтовые магмы менее чувствительны к дифференциации и потере сульфидов во время прохождения через мантийную литосферу и нижние уровни коры и остаются обогащенными Ni и МПГ при внедрении в верхнюю кору. Рифты могут также содержать богатые серой осадки, которые служат внешним источником для насыщения серой мантийных магм и способствуют формированию Ni-МПГ сульфидных руд.

Ключевые слова: *архейские провинции, сульфидные никель-платинометалльные руды, факторы рудообразования.*

S. I. TURCHENKO (IPGG RAS)

## The features of formation sulphide-nickel and platinum-bearing (Ni-МПГ) ores at Archaean provinces

The most important and actual problems geology-mineralogical research in XXI century are investigation of formation Ni-МПГ sulphide ores in mantle rocks and hosted materials, also its tectonic position. Sulphides ores usually belong to mafic-ultramafic rock associations formed in conditions of continental rifts. Such conditions promote rapid delivery of mantle magmas at Earth's crust. In result rift magmas have tendency to be low sensibility to differentiation and sulphide loss during passage through lithosphere and low levels of the crust. So the magmas can be enrichment by Ni and МПГ during intrusion at upper crust. The rifts can also contain sulphur-rich sediments that can serve external sources for saturation of sulphur the mantle magmas and further of formation Ni-МПГ sulphide ores.

Keywords: *Archaean provinces, sulphide nickel-platinum ores, factors oreforming.*

**Факторы формирования Ni-МПГ сульфидных руд.** Относительно важный фактор рудоносности — возраст мафит-ультрамафитовых тел и рифтогенных структур. Коматиитовый магматизм наиболее активный в архее, имел плюм-тектоническое происхождение и позволял наиболее быструю доставку таких магм к верхнекоровым уровням. С другой стороны, обогащенные серой осадочные породы были идеальными контаминантами для насыщения серой магматических тел, хотя, возможно, незначительно распространенные в палеоархее по сравнению с другими раннедокембрийскими эпохами. Таким образом, возраст мафит-ультрамафитовых изверженных серий и вмещающих их пород может играть важную роль как ведущий фактор в разведочной геологии. Это обстоятельство является важным фактом, определяющим то, что содержания сульфидного никеля и платиноидов распространены в большей степени в коматиитах и коматиитовых базальтах, а также приурочены к древнейшим бонинитовым интрузиям, размещенным в архейских провинциях (таблица).

Таковыми типичными коматиитовыми, вмещающими сульфидные Ni-МПГ магматические месторождения, являются ассоциации в неархейских (3,0–2,7 млрд лет) зеленокаменных поясах Зап. Австралии (тип Камбалда) и Канаде (пояса Абитиб) или с коматиитовыми базальтами, палеопротерозойскими бонинитами и габбро-верлитами риф-

тогенного пояса Томпсон в архей-протерозойской провинции Черчилл в Канаде [4, 14] и Печенги в Кольской архейской провинции. В противоположность этому коматииты из палеоархейских (3,6–3,4 млрд лет) зеленокаменных поясов или их фрагментов типа пояса Барбертон в Ю. Африке не несут заметного сульфидно-никелевого и платинового оруденения. Так, например, небольшое месторождение Бон Аккорд хотя и относится к коматиитвмещающим [13] и предельно богато Ni (до 36 % NiO), но исключительно обеднено серой. Причиной незначительного распространения Ni сульфидных руд в коматиитах Ю. Африки является обедненность их именно серой.

### Содержание Ni в ppm и МПГ (Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd) в ppm в типовых мафит-ультрамафитовых породах

Элемент	Коматиит в среднем [5]	Базальт [3]	Бонинит [10]
Ni	1246	97	522
Os	1,5	0,07	0,07
Ir	1,7	0,23	1,20
Ru	4,4	4,70	5,40
Rh	1,4	4,00	5,50
Pt	10,5	61	
Pd	10,5		

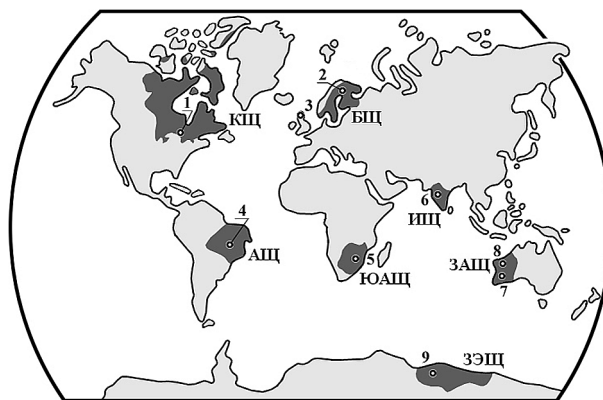
Магматические Ni-МПГ сульфидные руды, ассоциирующие с коматиитами, обычно находятся в основании лавовых потоков коматиитов или коматиитовых базальтов. Наиболее популярна модель рудообразования, формирующегося при магматической ассимиляции серы из осадочного субстрата. Основой этой модели является насыщение серой и сегрегация несмесимого сульфидного расплава в основании коматиитовых лавовых потоков. Коматииты имеют значительно более высокий сульфидно-никелевый потенциал по сравнению с базальтами. Это может быть объяснено более высокой температурой их расплавов (156 °С) по сравнению с базальтами (1250–1200 °С) и в связи с этим большей способностью к ассимиляции любых несущих серу окружающих пород [2]. Кроме того, коматииты обладают значительно более высоким содержанием Ni по сравнению с базальтами (таблица), так что любые сульфиды, которые могут в них образоваться, потенциально более никеленосны и соответственно платиноносны. Потоки коматиитовых лав имели турбулентный характер, и, таким образом, сульфиды, которые были локализованы в них, изначально носили форму суспензии, перед тем как концентрировались в основании лавовых потоков, силлов или краевых частях даек, представляющих собой подводные каналы таких потоков. По приведенной модели вполне объяснимо отсутствие руд в областях, содержащих богатые серой осадочные породы, но не имеющих коматиитовых лавовых потоков, или в областях, содержащих подобные потоки, но не содержащих пород, которые могли бы быть источником серы.

**Различия между древнейшими коматиитами и рудоносными коматиитами неогархея.** Сульфидно-никелевые платиноносные руды обычно ассоциируют с неогархейскими коматиитами интрузивных и вулканических фаций или же с бонинитовыми и габбро-верлитовыми интрузиями, приуроченными к толеит-базальтовым вулканитам палеорифтовых поясов в архейских провинциях [1]. Неогархейские (2,85–2,7 млрд лет) рудоносные коматиитсодержащие провинции представлены зеленокаменными поясами Норсеман-Калгурли, Агну-Вилуна и Форрестайня в Зап. Австралии; поясами Кидд-Мунро и Тисдейл в провинции Абитибби в Канаде. Палеопротерозойские бонинитовые сульфидно-никеленосные и платиноносные мафит-ультрамафитовые интрузии с возрастом 2,5–2,35 млрд лет характеризуют глобальный этап рифтогенеза и распространены в большинстве архейских кратонов (рис. 1). Они представлены платиноносными интрузиями с малосульфидно-никелевым оруденением: в архейском кратоне Зимбабве – Великая Дайка (2460 ± 16 млн лет), в рифтогенном обрамлении Карельского кратона на Балтийском щите – линейные пояса интрузий Койлисмаа-Суханко в Сев. Финляндии и Олангской группы в Сев. Карелии; расслоенные интрузии Кольского п-ва – Мончеплутон и Федорово-Панские тундры (2460 ± 16 млн лет), в рифтогенном обрамлении Карельского кратона на Балтийском щите – линейные пояса интрузий Койлисмаа-Суханко в Сев. Финляндии и Олангской группы в Сев. Карелии; расслоенные интрузии Кольского п-ова – Мончеплутон и Федорово-Панские тундры (2450–2470 ± 30 млн лет); интрузии комплекса Ист Булл Лейк (2,45 млрд лет) в провинции Онтарио на Канадском щите.

Значительно более древние коматиитсодержащие зеленокаменные пояса с возрастом 3,6–3,4 млрд лет, распространённые в Каапваальском кратоне в Ю. Африке и кратоне Пилбара в Зап. Австралии, несут лишь слабовыраженное сульфидно-никелевое платиноносное оруденение. В разновозрастных поясах Абитибби (Канада) в палеоархейских коматиитах также отсутствует сульфидно-никелевая минерализация, в то время как неогархейские коматиитсодержащие пояса несут сульфидно-никелевые с платиной месторождения и признаки контаминации сульфидсодержащих сланцев [11]. Это может поддерживать модель соотношения между возрастом коматиитовых лав и их потенциальной возможностью ассимилировать вмещающие породы и нести сульфидно-никелевое с платиной оруденение.

Древнейшие коматииты отчетливо отличаются по главным элементам и элементам-примесям от более молодых коматиитов любых докембрийских провинций. Наиболее заметно это в отношении деплетированности древнейших коматиитов (например, пояса Барбертон в Ю. Африке)  $Al_2O_3$ , Ti, V, Sc и HREE [9]. Предполагается, что эти особенности состава связаны с низкими степенями (около 30 %) парциального плавления мантии в условиях высокого давления от 7 до 10 ГПа (гигапаскаль) [6] (1 ГПа = 10 кбар). Условия высокого давления мантийных расплавов характеризовали палеоархейскую мантию ранних этапов эволюции Земли (рис. 2). Однако некоторые зеленокаменные пояса, такие как Абитибби в Канаде, содержат оба типа коматиитов и соответственно можно предположить, что деплетированные глиноземом и недеплетированные коматииты могли быть образованы и вынесены из разных по глубинности частей одного и того же плюма [12]. Древнейшие коматииты были образованы, вероятно, при плавлении метасоматизированной субконтинентальной литосферной мантии.

Коматииты, подобные древнейшим зеленокаменным поясам типа Барбертон в Ю. Африке,



**Рис. 1. Глобально проявленные области мафит-ультрамафитового магматизма начального этапа континентального рифтогенеза палеопротерозоя (2,5–2,4 млрд лет)**

1 – интрузии комплекса Ист Булл Лейк, дайки Херст-Матачеван и базальты группы Эллиот Лейк Канадского щита (КЩ); 2 – интрузии, дайки Пя-озера, Виинаки и базальты сумия-сариолия севера Балтийского щита (БЩ); 3 – дайки Скоур в Шотландии; 4 – интрузия габбро-анортозитов Никеландия Амазонского щита (АЩ); 5 – Великая Дайка Южно-Африканского щита (ЮАЩ); 6 – дайки штата Майсур и базальтоиды пояса Аравалли Индийского щита (ИЩ); 7 – интрузия Джимберлана и дайки Биннеренжи Западно-Австралийского щита (ЗАЩ); 8 – дайки холмов Вестфолд щита Земли Эндерби (ЗЭЩ)

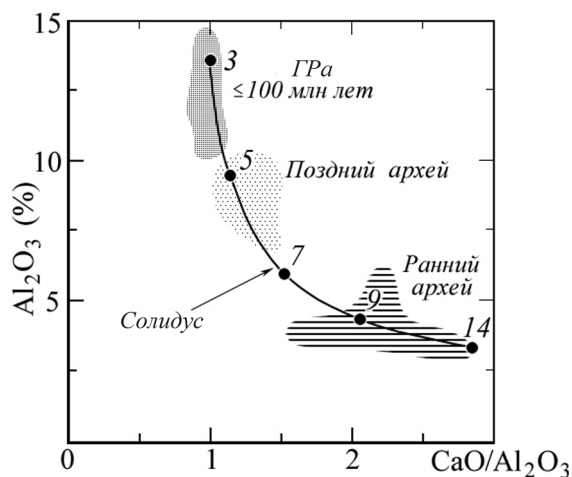


Рис. 2. Точками показана область с давлением 5–7 ГПа, характерная для неoarхея – палеопротерозоя, в которой возникали возможности для контаминации и обогащения серой мафит-ультрамафитовых мантийных пород при формировании Ni-МПП сульфидных руд. Горизонтальной штриховкой показана область 9–14 ГПа, где подобная контаминация затруднена

имеют гораздо более низкое содержание металлов платиновой группы (МПП) и низкое Pd/Ir отношение, чем глинозем-недеплетированные коматииты более молодых поясов различных архейских кратонов. Растворимость серы и содержание МПП в базальт-пикритовых магмах сильно зависят от глубин их выплавления [8]. При 10 ГПа и 1810 °C пикриты могут растворять до 685 ppm S, а при 14 ГПа и 2000 °C они могут растворить лишь 386 ppm S (рис. 2). Если эти результаты применить для коматиитов и предположить, что примитивная мантия содержит приблизительно 200 ppm серы, то неoarхейские не деплетированные в отношении глинозема коматииты требуют 30 % плавления мантии, чтобы поглотить все сульфиды источника, в то время как палеoarхейские такие же коматииты требуют 50 % парциального плавления. Таким образом, данные по содержанию МПП поддерживают модель происхождения палеoarхейских коматиитов из глубинной мантии – более глубинной, чем это требуется для коматиитов, не деплетированных по глинозему и несущих Ni-МПП сульфидное оруденение.

**Причины отсутствия значительных количеств Ni-МПП сульфидных руд в палеoarхейских провинциях.** Как было отмечено, деплетированные по глинозему коматииты, которые были образованы на глубинах с давлением 14 ГПа, содержат на 50 % меньше серы, чем не деплетированные, образующиеся при 10 ГПа. Температура излияния деплетированных на 100 °C выше, чем не деплетированных, что сказывается на более высокой растворимости серы во время излияния вышних. Поэтому деплетированные коматииты требуют гораздо большей доли участия в контаминации внешнего дополнительного источника серы для достижения насыщения серой коматиитов и проявления в них Ni-МПП рудоносности.

Палеoarхейская кора кратонов Каапваал и Пилбара могла быть менее насыщена серой, чем неoarхейская кора кратонов Йилгарн, Зимбабве,

Карело-Кольского и поясов Абитибиды. В результате термальная контаминация коры мантийными расплавами в неoarхейских кратонах была более значительной для насыщения серой. Коровые признаки (такие как значения изотопного состава серы) могут быть значительно занижены в магматических системах [7], и такие свидетельства коровой контаминации часто трудны для определения. В случае с палеoarхейскими коматиитами возникают дополнительные проблемы, выраженные в том, что их основание часто не обнажено, и, таким образом, прямое определение содержания серы в субстрате коматиитовых лав невозможно. В истории эволюции палеoarхейских поясов отмечаются факты низкой активности серы и указывается на широкое распространение железисто-кварцевых фаций (железистых кварцитов). Субстрат (вмещающие породы) коматиитовых потоков мог быть в палеoarхею более примитивным, чем в неoarхею или палеопротерозое, и поэтому был более труден для ассимиляции лавовыми потоками коматиитов. Если неoarхейская кора была более легкой и эволюционированной, чем палеoarхейская, то поднимающиеся в промежуточные камеры магмы могли легче ассимилировать вмещающие породы. При формировании древнейших коматиитов кора была более плотной и маломощной, магмы изливались без предварительного внедрения в промежуточные камеры и поэтому были менее контаминированными. Форма плюмов должна была быть также иной – плитообразной (рис. 3). В соответствии

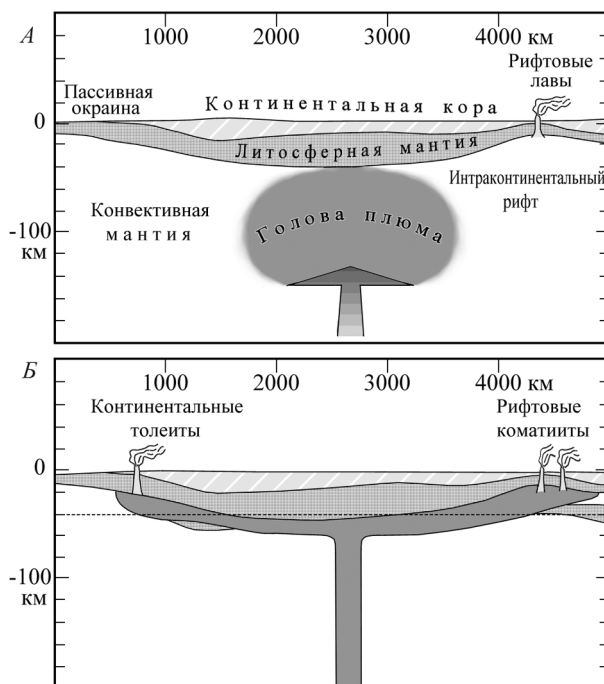


Рис. 3. Схема плюмов, распространенных под различной континентальной литосферой

А – плюм воздействует на уже достаточно мощную литосферу, его форма ограничена и производит при тектонической активности промежуточные камеры с возможным контаминационным воздействием в неoarхею–палеопротерозое; Б – палеoarхейский и эoarхейский этапы характеризуются плитообразной формой плюмов, когда излияния коматиитов происходили в рифтах без предварительного взаимодействия с вмещающими породами, что исключало существенные контаминационные воздействия и соответственно добавку серы к Ni-МПП рудам

с этим можно предполагать, что для молодых коматиитов коровая ассимиляция могла быть тем начальным механизмом, который способствовал сегрегации сульфидов и платиноидов в промежуточных камерах. Часть никельсодержащих сульфидов и платиноидов могла быть перемещена из промежуточных магматических камер флюидами и отложена в основании коматиитовых потоков или лейкократовых дифференциатах (анортозитах или лейкократовых дифференциатах (анортозитах или лейкократовых дифференциатах) расслоенных интрузий.

Многие не деплетированные по глинозему неархейские коматииты также могут быть безрудными в отношении платиноносных сульфидно-никелевых руд. Это может быть связано и с провинциальными геохимическими особенностями территорий, и с незначительной современной распространенностью областей с сохраненными палеоархейскими коматиитами, в которых сульфидно-никелевое платиноносное оруденение, возможно, еще не открыто.

1. Турченко С.И. Металлогения тектонических структур палеопротерозоя. — СПб.: Наука, 2007. — 175 с.

2. Arndt N.T., Ginibre C., Albarede F., Chebble M., Herzberg C., Jenner G., Lahaye Y. Ore deposits associated with mafic magmas in the Kaapvaal craton // *Geology*. 1998. Vol. 26. — P. 739–742.

3. Brüggmann G.E., Naldrett A.J., Asif M., Lightfoot P.C., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian Trap in the Noril'sk region, Russia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993. Vol. 57. — P. 2001–2018.

4. Condie K.C. Mantle plumes and their record in Earth history. — Cambridge: Cambridge University Press. U.K., 2001. — 306 p.

5. Crocket J.H. Platinum group element geochemistry of mafic and ultramafic rocks // *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Beneficiation of МПГ / L.J. Cabri (ed.)*. — CIM Spec., 2002. Vol. 54. — P. 177–210.

6. Herzberg C. Generation of plume magmas through time: an experimental approach // *J. of Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. — P. 4521–4540.

7. Leshner C.M., Burnham O.M., Keays R.R., Barnes S.-J., Hulbert L. Trace elements geochemistry and petrogenesis of barren and ore-associated komatiites // *Canadian mineralogist*. 2001. Vol. 39. — P. 673–696.

8. Mavrogenes J.A., O'Neill H. St. C. The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulphide in mafic magma // *Geochem. et Cosmochim. Acta*. 1999. Vol. 65. — P. 1175–1180.

9. Nesbit R.W., Sun S.-S., Purvis A.C. Komatiites geochemistry and genesis // *Canadian Mineralogist*. 1979. Vol. 17. — P. 165–186.

10. Peck J., Keays R.I. Insights into the behaviour of precious metals in primitive, S-undersaturated magmas: Evidence from the Heazlewood River complex, Tasmania // *Canadian Mineralogist*. 1990. Vol. 28. — P. 553–577.

11. Sproule R.A., Leshner L.M., Ayer J.A., Thurston P.C., Harzberg C.T. Spatial and temporal variations in the geochemistry of komatiites and komatiitic basalts in the Abitibi greenstone belt // *Precambrian Res.* 2002. Vol. 115. — P. 153–186.

12. Tomlinson K.Y., Hughes D.J., Thurston P.C., Hal R.P. Plume magmatism and crustal growth at 2.9 to 3.0 Ga in the

Steep Rock and Lumby Lake area, western Superior Province // *Lithos*. 1999. Vol. 46. — P. 103–136.

13. Tredoux M., Roelofse F., Shukolyukov A. A Cr isotopic study of the Bon Accord NiO body in the Barberton greenstone belt, South Africa // *Chemical Geology*. 2014. Vol. 390. — P. 182–190.

14. Zwanzić H.V., Macek J.J., McGregor C.R. Lithostratigraphy and geochemistry of the High-grade metasedimentary rocks in the Thompson nickel belt and adjacent Kisseynew domain, Manitoba: implication for nickel exploration // *Econ. Geol.* 2007. Vol. 102, No 7. — P. 1197–1216.

1. Turchenko S.I. Metallogeniya tektonicheskikh struktur paleoproterozoya [Metallogeny and tectonic structures of the Paleoproterozoic]. St. Petersburg: Nauka. 2007. P. 175 c.

2. Arndt, N.T., Ginibre, C., Albarede, F., Chebble, M., Herzberg, C., Jenner, G., Lahaye, Y. 1998: Ore deposits associated with mafic magmas in the Kaapvaal craton. *Geology*, vol. 26. 739–742.

3. Brüggmann, G.E., Naldrett, A.J., Asif, M., Lightfoot, P.C., Gorbachev, N.S., Fedorenko, V.A. 1993: Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian Trap in the Noril'sk region, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 57. 2001–2018.

4. Condie, K.C. 2001: Mantle plumes and their record in Earth history. *Cambridge: Cambridge University Press*. U.K. 306.

5. Crocket, J.H. 2002: Platinum group element geochemistry of mafic and ultramafic rocks. In Cabri, L.J. (ed.): *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Beneficiation of МПГ*, vol. 54, 177–210. CIM Spec.

6. Herzberg, C. 1992: Generation of plume magmas through time: an experimental approach. *J. of geophysical research*, vol. 97. 4521–4540.

7. Leshner, C.M., Burnham, O.M., Keays, R.R., Barnes, S.-J., Hulbert, L. 2001: Trace elements geochemistry and petrogenesis of barren and ore-associated komatiites. *Canadian mineralogist*, vol. 39. 673–696.

8. Mavrogenes, J.A., O'Neill, H. St. C. 1999: The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magma. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, vol. 65. 1175–1180.

9. Nesbit, R.W., Sun, S.-S., Purvis, A.C. 1979: Komatiites geochemistry and genesis. *Canadian Mineralogist*, vol. 17. 165–186.

10. Peck, J., Keays, R.I. 1990: Insights into the behaviour of precious metals in primitive, S-undersaturated magmas: Evidence from the Heazlewood River complex, Tasmania. *Canadian Mineralogist*, vol. 28. 553–577.

11. Sproule, R.A., Leshner, L.M., Ayer, J.A., Thurston, P.C., Harzberg, C.T. 2002: Spatial and temporal variations in the geochemistry of komatiites and komatiitic basalts in the Abitibi greenstone belt. *Precambrian Research*, vol. 115. 153–186.

12. Tomlinson, K.Y., Hughes, D.J., Thurston, P.C., Hal, R.P. 1999: Plume magmatism and crustal growth at 2.9 to 3.0 Ga in the Steep Rock and Lumby Lake area, western Superior Province. *Lithos*, vol. 46. 103–136.

13. Tredoux, M., Roelofse, F., Shukolyukov, A. 2014: A Cr isotopic study of the Bon Accord NiO body in the Barberton greenstone belt, South Africa. *Chemical Geology*, vol. 390. 182–190.

14. Zwanzić, H.V., Macek, J.J., McGregor, C.R. 2007: Lithostratigraphy and geochemistry of the High-grade metasedimentary rocks in the Thompson nickel belt and adjacent Kisseynew domain, Manitoba: implication for nickel exploration. *Econ. Geol.*, vol. 102, 7, 1197–1216.

Турченко Станислав Иванович — доктор геол.-минер. наук, зав. лабораторией, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН. Наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199036, Россия. <turchsi@mail.ru>

Turchenko Stanislav Ivanovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the laboratory, RAS Institute of the Precambrian Geology and Geochronology (IPGG RAS). 2 Makarov Embankment, St. Petersburg, 199034, Russia. <turchsi@mail.ru>