

Структурно-морфологические формы размещения мафит-ультрамафитовых интрузий с сульфидным Cu-Ni-PGE оруденением

Образование сульфидных Cu-Ni-PGE месторождений происходит в ассоциации с мафит-ультрамафитовыми интрузиями, которые локализуются в пространствах растяжения земной коры, приуроченных к зонам разломов с горизонтальным смещением пород. Эти разломы часто размещаются в областях рифтинга провинций изверженных пород благодаря воздействию стрессовых явлений, генерированных плюм-тектонической активностью. В работе обсуждается структурная морфология крупных и небольших сульфидных Cu-Ni-PGE месторождений, которые ассоциируют с мафит-ультрамафитовыми интрузиями. Кроме того, показано, что геометрия интрузий, вмещающих месторождения, и локализация минеральных зон в них может быть структурно подразделена на группы и контролируется пространством, создаваемым структурными деформациями.

Ключевые слова: мафит-ультрамафитовые интрузии, сульфидные никель-платинометалльные месторождения, структурно-морфологические формы.

Mafic-ultramafic intrusions with sulfide Cu-Ni-PGE mineralization: morphology and structural position

The formation of sulfide Cu-Ni-PGE deposits occurs in association with mafite-ultramafite intrusions, which are located in crustal stretching spaces, confined to fault zones with horizontal displacement of rocks. These faults are often located in rifting areas of igneous provinces due to the stress phenomena generated by plume-tectonic activity. The paper discusses structural morphology of large and small sulfide Cu-Ni-PGE deposits related to mafite-ultramafite intrusions. In addition, it is shown that the geometry of the intrusions, hosting deposits, and the location of mineral zones in them can be structurally subdivided into groups and controlled by the space created by structural deformations.

Keywords: mafic-ultramafic intrusions, sulfide Cu-Ni-PGE deposits, structural and morphological forms.

Для цитирования: Турченко С. И. Структурно-морфологические формы размещения мафит-ультрамафитовых интрузий с сульфидным Cu-Ni-PGE оруденением // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 86. – С. 92–96. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_92-96

Введение. Главные черты геологического контроля по образованию и локализации Ni-Cu-PGE сульфидного оруденения всегда были предметом широкого обсуждения. Общепринято, что образование экономических концентраций такого оруденения требует:

- изначально обогащенной серой и не деплезированной по Ni, Cu, PGE родительской магмы, произошедшей из мантии;

- тектонических событий в обогащенных серой изверженных провинциях, которые производят сульфиды;

- обогащения сульфидов экономически важными металлами в силикатной расплавной среде или при ее флюидно-метасоматических преобразованиях;

- накопления и локализации сульфидного оруденения в границах интрузивных и флюидно-метасоматических тел.

Составы этих сульфидных накоплений могут быть определены процессами, которые разделяются на две группы:

- фракционная кристаллизация магматических сульфидов, производимых расплавом, обогащенным Cu-Ni-PGE и моносульфидным твердым раствором;

- модификацией постмагматических процессов, которые ремобилизуют и фракционируют сульфиды во время деформаций, метаморфизма и гидротермальной активизации.

Петрологии и геохимии сульфидсодержащих пород и их магматическим процессам было уделено довольно много внимания [7; 13] в отличие от морфологии магматических камер и условий образования в них сульфидного оруденения. Мафит-ультрамафитовые интрузии, которые содержат Ni-Cu-PGE сульфидное оруденение, демонстрируют ключевые черты принадлежности к указанным группам пород:

— объемы сульфидов, как и содержание в них металлов, по отношению к силикатной магме в интрузиях высокие, соответственно эти сульфиды могли образоваться непосредственно в виде сегрегаций или накоплений в силикатной магме интрузий;

— распространение типов пород, несущих оруденение, сложное и включает породы от ультрамафитовых до мафитовых типов, как и локальное распространение магматических брекчий, которые ассоциируют с сульфидным оруденением;

— интрузии обладают морфологией, которая контролируется ранее существующими структурами в коре, продвигающими магмы из мантии в верхние уровни коры.

Примеры структурного контроля геометрии магматических камер с сульфидным Cu-Ni-PGE оруденением. Значительные сульфидно-никелевые месторождения ассоциируют с хонолитами, которые представлены месторождениями Норильской группы в России, Войсис-Бэй, Садбери в Канаде и Джинчуан в Китае. В Южной Африке месторождение Нкомати возраста 2,055 млрд лет ассоциирует с интрузией, комагматичной расслоенной серии Рустенберг интрузии Бушвелд [8; 11]. Мафит-ультрамафитовые интрузии Печенгского и Воронежского рифтогенных бассейнов (1,97–1,95 и 2,04–2,08 млрд лет соответственно [6; 15]) обладают близким к интрузии Нкомати возрастом. Последняя отражает возраст блока, вмещающего интрузию Бушвелд в составе Капваальского кратона. Срединно-континентальный рифт возраста 1,1 млрд лет в штате Мичиган в Северной Америке содержит мощную последовательность базальтов и в пределах этого рифта вмещает габбро-анортозитовые интрузии, с которыми ассоциирует Cu-Ni-PGE сульфидное оруденение (например, в интрузии Дулут). Но также известны мафит-ультрамафитовые интрузии и вне границ этого рифта, отвечающие по возрасту времени его растяжения и несущие мафит-ультрамафитовые интрузии с Ni-Cu-PGE сульфидным оруденением. Эти интрузии представлены мафическим телом Игл в штате Мичиган, интрузиями Тамарак в штате Миннесота, Каррент-Лейк в провинции Онтарио, Канада и другими рудоносными мафит-ультрамафитовыми интрузиями вдоль границ рифтовой тектонической зоны района Великих озер в Канаде [9]. Сульфидно-никелевые месторождения этой зоны являются хорошим примером дифференцированных интрузий с сульфидной минерализацией с не очень понятной морфологией рудных тел, но все же приближающейся к дайкоподобной морфологии оруденения.

Трубообразный стиль мафит-ультрамафитовых интрузий принадлежит не только фанерозойским и неопротерозойским интрузиям, но и позднеархейским телам, таким как интрузия Игл Несет с возрастом 2734 млн лет в провинции Онтарио (Канада), а также возрастной границе с палеопротерозоем (около 2500 млн лет), подобно

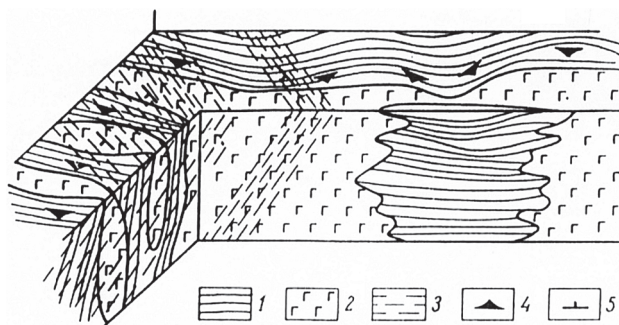


Рис. 1. Характер соотношения никеленосных ультрабазитов с туфогенно-осадочными сульфидно-углеродистыми сланцами и наложенной сланцеватостью, синхронной с метаморфическими преобразованиями. Зарисовка участка карьера Котсельваара, Печенга

1 — туфогенно-осадочные сульфидно-углеродистые сланцы; 2 — тела ультрабазитов; 3 — зоны наложенного рассланцевания с метаморфогенными вкрапленными Cu-Ni рудами; 4 — залегание слоистости; 5 — залегание сланцеватости

Мончегорской интрузии (Кольский полуостров, Россия). Другие небольшие и крупные сульфидно-никелевые месторождения палеопротерозоя в мафит-ультрамафитовых интрузиях, имеющих форму хонолитов, значительно деформированы и метаморфизованы [4]. Примеры также включают в свой состав Cu-Ni-PGE месторождения Печенги (Россия) с возрастом 1,97 млрд лет, в которых небольшие объемы серпентинизированных перидотитовых плитообразных тел (рис. 1) ассоциируют с большими объемами Cu-Ni-PGE сульфидных руд [3], и месторождение Томпсон (1,87 млрд лет) в никелевом поясе Томпсон провинции Манитоба в Канаде [10]. Другим примером может быть месторождение Кабанга (1,4 млрд лет) в Танзании [12], где небольшие ультрамафитовые рудоносные тела обладают заметным геометрическим сходством с рудоносными ультрамафитами Печенги в России. В Западной Австралии пример хонолитов с сульфидным оруденением развит в структуре Холл-Крик, где интрузия Салли-Малай (1,88 млрд лет) вмещает сульфидно-никелевое оруденение трубчатой морфологии, сходное с трубками месторождения Войсис Бэй [14]. Аналогичные по возрасту Cu-Ni месторождения Алдано-Станового щита [1] связаны с пластовыми ультрамафитами, прорывающимися Кунь-Маньенские габбро-анортозиты.

Структурные модели сульфидных Cu-Ni-PGE тел в месторождениях мафит-ультрамафитовых интрузий, связанных с горизонтально-надвиговыми структурами. Важная черта земной коры выражена в долгоживущей сети горизонтально-надвиговых разломов, которые являются кинематическим продуктом движения тектонических плит. Пологие разломы встречаются в разных рангах размещения. Наиболее интересное из них связано с образованием мафит-ультрамафитовых интрузий в палеопротерозойских рифтовых бассейнах [2]. Такие разломы развиваются во время

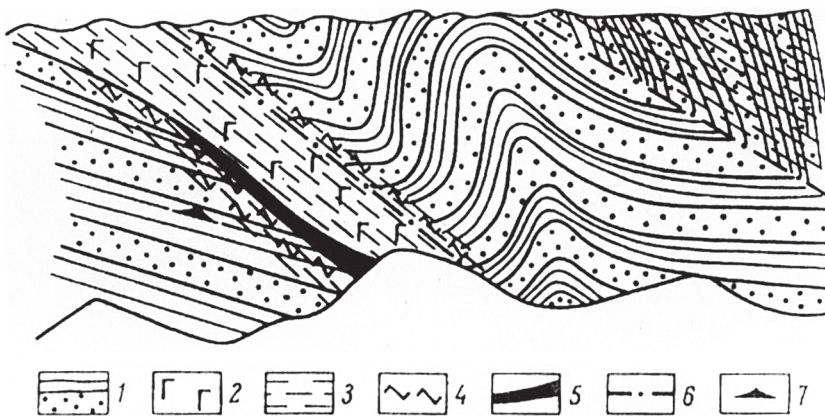


Рис. 2. Характер размещения жильных и брекчиевых метаморфогенных Cu-Ni руд в зонах наложенного расщепления и метаморфического изменения ультрабазитов во вмещающих сульфидно-углеродистых туфогенно-осадочных породах. Зарисовка стенки карьера рудника Пильгьярви, Печенга

1 – туфогенно-осадочная сульфидно-углеродистая толща; 2 – ультрабазиты; 3 – зоны наложенного расщепления и метаморфического преобразования; 4 – брекчиевые руды в зонах расщепления; 5 – жильные руды; 6 – разрывные нарушения; 7 – залегание слоистости

пассивного или плюм-иницированного активного рифтингов, когда формируются глубинные покровные зоны, контролирующие миграцию магм из мантии к поверхностным частям покровов. В таких областях потоковые структуры чувствительны к перемещению вещества и выражаются в образовании эшелонированных складок, в которых осуществляется перемешивание стратифицированных метаморфизованных осадочных пород, содержащих сульфидно-графитовые сланцы. Одновременно с этим происходит внедрение мантийных мафит-ультрамафитовых пород, иногда обогащенных никелем, в образующиеся полости, имеющие чаще всего формы хонолитов. Это связано с тем, что формирование полостей происходит во вмещающих породах с разной анизотропией плотности, поэтому образуются пространства либо плоскостные с растянутой ромбовидной формой, либо в компетентных породах вертикально вытянутые формы, дающие трубообразные или дайкообразные пространства для внедрения мантийных магм (рис. 2). В конечном итоге сочетание деформаций пород различной компетентности и структурной анизотропии с проявлением метаморфических термодинамических условий приводит к выражению разнообразных форм сульфидных Cu-Ni-PGE рудных тел.

Одна группа интрузий обладает в плане формой ассиметричного ромбоида с длинными осями, субпараллельными зоне разлома, и контактами с вмещающими породами, структурно деформированными во время или после внедрения магмы или флюидов. Типичный вертикальный разрез такой формы имеет сужающуюся конусообразную форму с искривленными стенками и часто дайкообразным килем в основании. Такая морфология характерна для рудных зон месторождения Войсис Бэй (1334 млн лет) в Канаде, многочисленных небольших месторождений в мезозойских мафит-ультрамафитовых интрузиях Китая или месторождениях типа Игл (1107 млн лет) в штате Мичиган, США [9].

Вторая группа месторождений ассоциирует с дайками и плитообразными (силлами) интрузиями, их структурная форма согласуется с формой их вытянутости во время внедрения и последующих деформаций. Примерами могут быть

месторождение Коталахти (около 1850 млн лет) в Ладожско-Ботнической зоне Фенноскандинавского щита, а также отдельные рудные тела месторождения Войсис Бэй, где они ассоциируют с вытянутыми доменами гнейсов вблизи даек. Подобные структурные формы характерны для фанерозойских никеленосных провинций (месторождения Норильского региона России), приуроченных к синформным мафит-ультрамафитовым интрузиям, локализованным в западных частях рифтообразующего Норильско-Хараелахского разлома. Другими примерами дайкообразных сульфидно-никелевых рудных тел являются месторождения Купер Клифф (1850 млн лет) и Воррингтон, образующие радиальные формы вокруг изверженного комплекса Садбери в Канаде.

Третья группа интрузий с сульфидно-никелевым оруденением обладает формой сплюснутых трубок, примеры которых наблюдаются в таких палеозойских месторождениях, как Норильск-1 и Талнах (290–226 млн лет) в Норильском регионе России или Калатонге (282 млн лет) в Китае. Подобные структуры характерны и для протерозойских месторождений Бабел-Небо (1078 млн лет) в структуре блока Масгрейв в Австралии и Нкомати (2055 млн лет) в Южной Африке. Иногда эти сплюснутые трубообразные интрузии и рудные тела в них образуют подобие мостов, соединяющих более крупные безрудные интрузии. Примерами могут быть интрузия Тамарак, штат Миннесота в США, и комплекс Каррент-Лейк (1120 млн лет) в провинции Онтарио, Канада [9], насыщенные Ni-Cu сульфидным оруденением.

Во всех этих месторождениях мафит-ультрамафитовые интрузии проявлены как открытые системы путей магмы и поэтому для них может быть применим общий термин хонолиты. Кроме того, все эти интрузии характеризуются высоким сульфидно-силикатным отношением, в 1–3 раза превышающим содержание серы в магмах интрузий. Обогащение серой происходило при флюидно-метаморфогенном обогащении во время разложения сульфида железа – пирита в пирротин и высвобождении серы в условиях наличия сульфидсодержащих сланцев во вмещающих

магматические тела породах [5]. В месторождении Войсис Бэй (Канада) сульфиды были инъецированы с помощью даек, проникавших в верхние уровни магматических камер. Сходные модели вероятны для образования небольших сульфидно-никелевых месторождений в Китае и крупных в Норильском районе России.

Заключение. Экономическое значение сульфидно-никелевых месторождений с высоким содержанием Ni и PGE возрастает, так как при одинаковом объеме добываемой сульфидно-рудной массы они дают значительно больший ценностный потенциал. Это определяется их генетической природностью, связанной с инъецией магматических или флюидно-метаморфогенных тел, которые формируют их рудоносную часть и изменяют раннюю геометрию камер. Сильнодеформированные и метаморфизованные месторождения (Печенгские на Кольском полуострове, пояса Томпсон в Канаде и блока Йилгарн в Австралии) представлены сегментированными и будинированными ультрамафическими телами, подверженными двум-трем разовым деформациям, происходившими после внедрения этих тел. Тектоническая активность в кратонах с провинциями изверженных пород определяет ключевой контроль генезиса Cu-Ni-PGE сульфидных месторождений. Главный региональный контроль принадлежит горизонтально-надвиговой тектонике, определяющей локальную геометрию интрузий, и объясняет, почему сульфидные Cu-Ni-PGE месторождения ассоциируют именно с такими интрузивно-флюидными телами, которые имеют общие черты структурной морфологии.

Работа выполнена при выполнении темы 0153-2019-0001 «Геологические, изотопно-геохимические и петрологические критерии выделения глобальных рубежей формирования и эволюции континентальной коры и литосферной мантии древних щитов фундаментов Восточно-Европейской и Сибирской платформ».

1. Гурьянов В. А. Новый тип медно-никелевых месторождений юго-востока Алдано-Станового щита / В. А. Гурьянов, В. С. Приходько, А. Н. Пересторонин, Л. Л. Петухова, Ю. П. Погочкий, Л. П. Соболев // Докл. РАН. — 2009. — Т. 425, № 4. — С. 505–508.

2. Турченко С. И. Металлогения метаморфогенных сульфидных месторождений Балтийского щита. — Л.: Наука, 1978. — 120 с.

3. Турченко С. И. Металлогенические особенности Печенгской рифтогенной структуры (Кольский геоблок Балтийского щита) // Труды Карельского научного центра РАН. — 2016. — № 2. — С. 40–51.

4. Турченко С. И. Платинометаллическая и сульфидно-никелевая металлогения палеопротерозойского рифтогенеза на Балтийском щите // Геология рудных месторождений. — 2017. — Т. 59, № 2. — С. 83–92.

5. Турченко С. И. Высвобождение серы при метаморфизме пород в земной коре: применение к генезису

золоторудных месторождений // Региональная геология и металлогения. — 2019. — № 77. — С. 60–66.

6. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия) = Platinum-bearing formations of Kursk-Voronezh region (Central Russia). — Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 2004. — 448 с.

7. Barnes S.-J., Lightfoot P. C. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents // Economic Geology 100th Anniversary Volume / Ed. by J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb and J. P. Richards. — 2005. — Pp. 179–213.

8. De Waal S. A., Maier W. D., Armstrong R. A., Gauret C. D. K. Parental magma and emplacement of the stratiform Uitkomst Complex, South Africa // The Canadian Mineralogist. — 2001. — Vol. 39. — Pp. 557–572.

9. Lightfoot P. C., Evans-Lamswood D. Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces // Ore Geology Reviews. — 2015. — Vol. 64. — Pp. 354–386.

10. Lightfoot P. C., Stewart R., Gribbin G., Macek J., Mooney S. Relative contribution of magmatic and post-magmatic processes in the genesis of the Thompson Ni-Co sulfide ore deposits, Manitoba, Canada. 11th International Nickel Symposium: Abstract. — Guiyang, China, 2012.

11. Maier W. D. Platinum group elements in the Uitkomst Complex, South Africa / W. D. Maier, T. S. Gomwe, S.-J. Barnes, C. Y. Li, H. Theart // Economic Geology. — 2004. — Vol. 99, no. 3. — Pp. 499–516. DOI: 10.2113/gsecongeo.99.3.0499

12. Maier W. D. The Kabanga Ni sulfide deposit, Tanzania: I. Geology, petrography, silicate rock geochemistry, and sulfur and oxygen isotopes / W. D. Maier, S.-J. Barnes, A. Sarkar, E. Ripley, C. Li, T. Livesey // Mineralium Deposita. — 2010. — Vol. 45. — Pp. 419–441.

13. Naldrett A. J. From the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit // South Africa Journal of Geology. — 2010. — Vol. 113, no. 1. — Pp. 1–32.

14. Page R. W., Hoatson D. M. Geochronology of the mafic-ultramafic intrusions // Geology and economic potential of the Palaeoproterozoic layered mafic-ultramafic intrusions in the East Kimberley, Western Australia / Ed. by D. M. Hoatson, D. H. Blake. — Australian Geological Survey Organisation, Bulletin. — 2000. — Vol. 246. — Pp. 163–172.

15. Precambrian geology of the USSR / Ed. by D. V. Rundqvist, F. P. Mitrofanov. — Amsterdam: Elsevier, 1992. — Vol. 9. — 550 p.

1. Gur'yanov V. A., Prikhod'ko V. S., Perestoronin A. N., Petukhova L. L., Pototskiy Yu. P., Sobolev L. P. Novyy tip medno-nikelevykh mestorozhdeniy yugo-vostoka Aldano-Stanovogo shchita [A new type of copper-nickel deposits in the south-east of the Aldan-Stanovoy Shield]. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 425, no. 4, pp. 505–508. (In Russian).

2. Turchenko S. I. Metallogeniya metamorfofennykh sulfidnykh mestorozhdeniy Baltiyskogo shchita [Metallogeny of metamorphogenic sulfide deposits of the Baltic Shield]. Leningrad, Nauka, 1978, 120 p.

3. Turchenko S. I. Metallogenicheskie osobennosti Pechenskoy riftingennoy struktury (Kol'skiy geoblok Baltiyskogo shchita) [Metallogenic features of the Pechenga riftogenic structure (Kola geoblock of the Baltic Shield)]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2016, no. 2, pp. 40–51. (In Russian).

4. Turchenko S. I. Low-sulfide PGE and nickel sulfide metallogeny of Paleoproterozoic riftogenesis of the

- Fennoscandian Shield. *Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 83–92. (In Russian).
5. Turchenko S. I. Sulfur release during rock metamorphism in the Earth's crust: application to gold deposits genesis. *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, no. 77, pp. 60–66. (In Russian).
6. Chernyshov N. M. Platinonosnye formatsii Kursko-Voronezhskogo regiona (Tsentral'naya Rossiya) [Platinum-bearing formations of Kursk-Voronezh region (Central Russia)]. Voronezh, 2004, 448 p.
7. Barnes S.-J., Lightfoot P. C. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. In Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J. and Richards, J. P. (eds.): *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005, pp. 179–213.
8. De Waal S. A., Maier W. D., Armstrong R. A., Gauret C. D. K. Parental magma and emplacement of the stratiform Uitkomst Complex, South Africa. *The Canadian Mineralogist*, 2001, vol. 39, pp. 557–572.
9. Lightfoot P. C., Evans-Lamswood D. Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 64, pp. 354–386.
10. Lightfoot P. C., Stewart R., Gribbin G., Macek J., Mooney S. *Relative contribution of magmatic and post-magmatic processes in the genesis of the Thompson Ni-Co sulfide ore deposits, Manitoba, Canada. 11th International Nickel Symposium: Abstract*. Guiyang, China. 2012.
11. Maier W. D., Gomwe T. S., Barnes S.-J., Li C. Y., Theart H. Platinum group elements in the Uitkomst Complex, South Africa. *Economic Geology*, 2004, vol. 99, no. 3, pp. 499–516. DOI: 10.2113/gsecongeo.99.3.0499
12. Maier W. D., Barnes S.-J., Sarkar A., Ripley E., Li C., Livesey T. The Kabanga Ni sulfide deposit, Tanzania: I. Geology, petrography, silicate rock geochemistry, and sulfur and oxygen isotopes. *Mineralium Deposita*, 2010, vol. 45, pp. 419–441.
13. Naldrett A. J. From the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit. *South Africa Journal of Geology*, 2010, vol. 113, no. 1, pp. 1–32.
14. Page R. W., Hoatson D. M. Geochronology of the mafic-ultramafic intrusions. In Hoatson, D. M., Blake, D. H. (eds.): *Geology and economic potential of the Palaeoproterozoic layered mafic-ultramafic intrusions in the East Kimberley, Western Australia. Australian Geological Survey Organisation, Bulletin*, 2000, vol. 246, pp. 163–172.
15. Rundqvist D. V., Mitrofanov F. P. (eds.). *Precambrian geology of the USSR*. Amsterdam, Elsevier, 1992, vol. 9, 550 p.

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>