

С. И. ТУРЧЕНКО (ИГГД РАН), Ф. А. ТУРЧЕНКО (НИУ ВШЭ)

Cu-Ni-PGE ресурсы докембрийских сульфидных месторождений: аналитический обзор

Рудные месторождения, ассоциирующие с ультрамафит-мафитовым мантийным магматизмом, включают сульфидные никелевые месторождения, содержащие медь, платиноиды и сопутствующее им золото. Для сравнения рассматриваются платиноидноносные окисно-силикатные никелевые латеритные месторождения, образующиеся при тропическом выветривании рудоносных ультрамафитовых тел. Рудные месторождения ультрамафит-мафитового мантийного магматизма были широко распространены при развитии планеты Земля и отмечены на всех континентах.

Современные тенденции геологоразведочных работ на рудные месторождения в ультрамафит-мафитовых магматических формациях сравнимы с рыночной стоимостью производства добычных работ на металлы в указанных выше типах месторождений. Оценочный подход к разведке и поискам таких месторождений требует значительных затрат на их производство, в особенности учитывая их возможную производственную длительность отработки. Необходимо создание специальных оценочных аналитических образов по ресурсам металлов в рудоносных структурах и запасам в конкретных месторождениях.

Ключевые слова: докембрийские месторождения (Cu, Ni, Pt, Pd), ультрамафит-мафитовый магматизм, аналитический обзор, геологоразведочное проектирование.

S. I. TURCHENKO (IPGG RAS), F. A. TURCHENKO (HSE University)

Cu-Ni-PGE resources of the Precambrian sulphide deposits: analytic review

Ore deposits, associated with ultramafic-mafic magmatism (henceforth ODUM) include nickel sulphide deposits containing copper, platinoids (PGE-platinum group elements) and minor gold. Platinoid-bearing oxide-silicate nickel laterite deposits, which formed during tropical weathering of ore-bearing ultramafic bodies are discussed for comparison. ODUM deposits were widespread during the Earth evolution in all continents.

Present-day trends in geological exploration for ore deposits in ultramafic-mafic igneous formations are comparable to the market value of mining operations for metals in the above-mentioned types of deposits. The estimation approach to the exploration of such ore deposits requires significant costs, especially considering their possible mining duration. It is necessary to create special evaluative analytic reviews for metal resources in ore-bearing structures and reserves in particular ore deposits.

Keywords: Precambrian ore deposits (Cu, Ni, Pt, Pd), ultramafic-mafic magmatism, analytic review, geologic explorations.

Для цитирования: Турченко С. И., Турченко Ф. А. Cu-Ni-PGE ресурсы докембрийских сульфидных месторождений: аналитический обзор // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 89. – С. 93–106. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_89_93-106

Введение. Рудные месторождения ультрамафит-мафитового мантийного магматизма (РМУМ) являются главнейшими источниками стратегических металлов, таких как Cu, Ni, PGE (платиновая группа элементов), Cr, Ti, V, Au, и производственными составляющими для горнодобывающих предприятий. Исторически геологоразведочные и горнодобывающие инвестиции в этот класс рудных месторождений составляли ведущее значение для горнорудных компаний (Inco, Western Mining, Falconbridge) и крупных горнодобывающих корпораций (Vale,

Норильский Никель и Yinchuan Group). В 2000-е годы многие геологоразведочные предприятия стали инвесторами для разведки РМУМ с целью выявления рудных районов, известных соответствующей минерализацией, но считавшихся ранее не рентабельными для их разработки.

Для настоящего исследования были привлечены объекты РМУМ: массивы и геологические тела, содержащие сульфидную Cu-Ni-PGE минерализацию, платинометалльное (PGE) оруденение, вмещающее также и Cu-Ni магматогенные руды. С целью сравнения приведены данные по

латеритовым силикатно-никелевым месторождениям тропического выветривания, ставшим в последние годы основным источником добычи этих металлов в таких широтах. В настоящей статье проведено также независимое аналитическое исследование стоимости ресурсов и запасов (резервов) Cu-Ni-PGE металлов в РМУМ и оценка стоимости произведенных металлов, по крайней мере до 2015 г. Кроме того, рассмотрено географическое распространение РМУМ,

выраженное в магматических провинциях, вмещающих подобные месторождения, ведущее к обсуждению оптимальной геологоразведочной стратегии.

Использованные данные из опубликованных экономических источников. Резервы, ресурсы и данные по горному производству приведены в работе из материалов [30; 31]. Другие показатели заимствованы из опубликованной информации

Таблица 1

Статистические данные для мировых докембрийских месторождений со значениями Cu-Ni-PGE ресурсов по [30; 31]

Металлы	Cu-Ni ± PGE сульфидные месторождения N 66	PGE месторождения N 48	Латеритовые месторождения N 221
Ресурсы Cu, т			
В целом	18 794 131 000	13 380 272	—
Среднее	284 760 000	278 756	—
Содержание Cu, т			
В целом	90 907 536	16 668 478	—
Среднее	1 377 387	340 173	—
Ресурсы Ni, т			
В целом	21 088 320 000	13 758 724	17 134 433 000
Среднее	319 520 000	286 494	77 531 000
Содержание Ni, т			
В целом	83 428 714	20 693 727	194 953 053
Среднее	1 264 071	240 492	882 141
Ресурсы Pd, т			
В целом	—	18 355 439	—
Среднее	—	206 241	—
Содержание Pd, в унциях			
В целом	—	955 317 682	—
Среднее	—	10 733 907	—
Ресурсы Pt, т			
В целом	—	18 452 655	—
Среднее	—	207 333	—
Содержание Pt, в унциях			
В целом	—	1 360 034 718	—
Среднее	—	15 281 289	—
Цена металла, млн долл США и СНВ			
Cu			
Максимальная	236 339	56 384	—
Средняя	10 086	2543	—
Ni			
Максимальная	255 793	58 631	125 230
Средняя	18 687	6607	13 238
Pd			
Максимальная	209 691	55 678	—
Средняя	4924	55 678	—
Pt			
Максимальная	123 061	140 984	—
Средняя	6705	22 788	—
СНВ, долл. /т			
Максимальная	586	378	345
Средняя	129	126	158

Примечание: в целом – по мировым значениям, среднее – значения ресурсов в среднем по миру, N – количество рассмотренных месторождений.

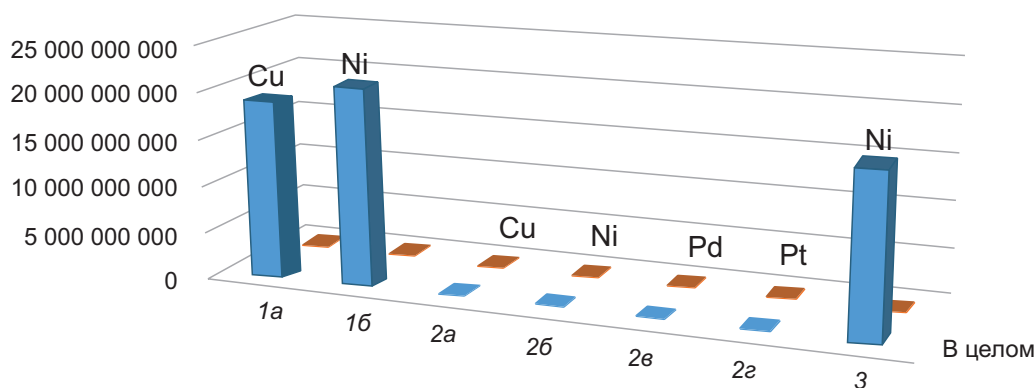


Рис. 1. Ресурсы Cu, Ni, Pd, Pt в рудных месторождениях ультрамафит-мафитового магматизма

Месторождения: 1 – докембрийские сульфидные Cu-Ni: а – для Cu и б – Ni; 2 – PGE докембрийские: а – для Cu, б – Ni, в – Pd, г – Pt; 3 – латеритовые (современные тропические силикатно-никелевые) показаны для сравнения ресурсов с докембрийскими (PC) месторождениями. Поскольку максимальные цифровые значения ресурсов (см. табл. 1) значительно превышают усредненные, на графике, составленном по программе Excel, они все условно показаны прямоугольниками. Синий цвет – максимальные значения в целом по миру, коричневый – усредненные

в обзорных вэб-статьях Геологической службы США и Природных ресурсов Канады. Там, где ресурсы рассмотрены специально, они сопровождаются опубликованными резервами и обозначениями категорий или градаций (измеренных, индицированных и неопределенных) так же, как доказанные и возможные [10]. Стоимостные оценки приведены в долларах США, а значения в унциях – тройских унциях (тр. унциях). Цены добытых руд и металлов основаны на средних значениях 2013–2014 гг. [22; 23].

Мировые резервы и ресурсы. В табл. 1 и на рис. 1 показаны статистические данные по ресурсам для: 1 – сульфидных Cu-Ni месторождений (раздельно по Cu и Ni), 2 – платинометалльных (PGE) и для сравнения по 3 – латеритовому типу никелевых месторождений (окисно-силикатные месторождения тропического выветривания); информацией послужили материалы, приведенные в прил. 1 [26]. Чтобы показать основы сравнения стоимости добываемых металлов из РМУМ, обсуждаемых в этой статье, в табл. 2 приведены значения стоимости одной тонны Cu, принятой за единицу сравнения с другими металлами. Подобно этому, показана оценка, эквивалентная стоимости налогового возврата государства (СНВ) за тонну оцененного ресурса, исходя из табл. 1.

Cu-Ni сульфидные и PGE месторождения.

Такие месторождения состоят из двух типов, обогащенных: медью (1а), никелем (1б) и платиноидами (2), т. е. PGE месторождения. В качестве оценочного сравнения приведена стоимость ресурсов латеритовых силикатно-никелевых месторождений. Сульфидные медно-никелевые месторождения географически широко распространены и обычно вмещают некоторые количества платиноидов. Но в настоящей работе рассмотрены только те из них, богатые металлами платиновой группы, которые находятся в составе

комплекса Бушвелд в Южной Африке [11], причем ресурсы и содержания Pd и Pt для них в табл. 1 приведены раздельно. Эти месторождения также содержат незначительное количество медного и никелевого оруденения.

Эквивалентная по меди генетически-ресурсная модель Cu-Ni-PGE сульфидных месторождений подразделяется по содержанию на Cu, Ni, Pd и Pt, а также и платинометалльные, т. е. PGE месторождения, в которых отмечены (кроме Pd и Pt) Ni и Cu в малых количествах. Эти месторождения по содержаниям меди могут быть подразделены на низкометалльные (< 1 % Cu эквивалента), среднеталльные (1–3 % Cu эквивалента) и с высоким содержанием металлов (более 3 % Cu эквивалента). Месторождения с высоким содержанием металлов в основном представлены сульфидными месторождениями, обогащенными Cu, Ni и PGE. Важным аспектом PGE месторождений преимущественно рифового типа, таких как UG2 и риф Меренского в комплексе Бушвелд в Южной Африке [11], является преобладание их постоянных градаций (т. е. месторождений рифового генотипа) над рангом размеров рудных тел. Применение таких тенденций к геологопоисковым работам на богатых платиноидами рифового генотипа месторождениях показывает, что

Таблица 2

Стоимостные эквиваленты по Cu для сравнения с другими металлами РМУМ

Вещественные единицы	Cu, т	Ni, т	Pt, тр. унция	Pd, тр. унция
Эквиваленты	1	2,049	0,654	0,319
Цена в долл. США	7,322	15,007	1,490	727

Примечание: 1 тр. унция = 31.103473 г (по данным Интернета за 2021 г.).

Глобальная рудничная продукция из всех месторождений по металлам, относящимся к РМУМ [26]

Металл	Единицы измерения	Продукция	Литературный источник продукции	Цена средняя, долл.	Источник цены	Стоимость продукции, млн долл.	Процент от глобального рынка металлов
Ni	Тонны	2 211 500	INSG	15,007	LME	33 188	3,3
Cu	Тонны	18 082 000	ICSG	7,322	LME	132 404	13,2
Pt	Тр. унции	5 740 000	JM	1,490	JM	8554	0,9
Pd	Тр. унции	6 430 000	JM	727	JM	4674	0,5

Примечание: INSG – International Nickel Study Group, ICSG – International Copper Study Group, JM – Johnson Matthey «Platinum 2013» Report, LME – London Metal Exchange.

геологопоисковые проектные работы могут быть больше сосредоточены на градациях (т. е. генетическом типе), чем параметрах размеров рудных тел и глубинах их залегания. Так, например, многие платинометалльные месторождения рифового типа находятся в глубинной и латеральной протяженности, сравнимой с месторождениями UG2 и рифа Меренского в комплексе Бушвелд. На этих месторождениях рудоносные тела прослежены на глубинах до 2-х км, а по протяженности – десятки километров [11].

Многие из мировых наивысших значений по ценности ресурсов приходятся на медно-никелевые сульфидные месторождения [19; 24]. К хорошо документированным примерам высокой стоимости сульфидных Cu-Ni с платиноидами месторождений относятся пояса Камбалда (Западная Австралия [8]), расслоенный комплекс Садбери (провинция Онтарио, Канада [6]) и Норильско-Талнахский рудный район (Таймырский регион, Восточная Сибирь, но эти классически представительные месторождения не докембрийские, поэтому здесь не рассматриваются). Обладая в общем значениями СНВ, достигающими 300 долл./т, эти месторождения позволяют вести выгодную добычу руды на глубинах ниже земной поверхности с сохранением

потенциала в течение многих лет своей жизни. Среди мировых высоких значений стоимости Cu-Ni-PGE руд находятся также руды JM рифа комплекса Стиллуотер (шт. Монтана, США). Резервы (запасы) рифа JM месторождений Стиллуотер обладают в среднем значением стоимости руды, учитывая стоимость СНВ в 400 долл./т, благоприятную для их добычи в глубинных условиях. Но более богатые платиноидами ресурсы, отмечаемые в комплексе Бушвелд (риф Меренского, риф UG2 и месторождения Платрифа), имеют в среднем значения стоимости СНВ 125 долл./т [26], и это позволяет вести рентабельно их добычу на больших глубинах.

По региональному распределению никелевые рудные месторождения, связанные с ультрамафит-мафитовой формацией мантийного магматизма (т. е. сульфидные Cu-Ni-PGE месторождения), ассоциируют с докембрийскими сульфидными месторождениями, распространенными в Африке, Евразии (главным образом на Фенноскандинавском щите), Северной Америке и Западной Австралии. Силикатно-никелевые месторождения (латеритовые) в современном распределении континентальной коры распространены в тропических областях Южной (главным образом в Бразилии) и Центральной Америки,

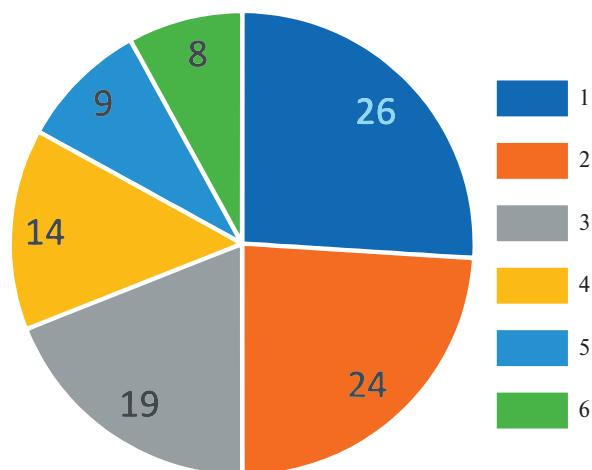


Рис. 2. Регионы, преимущественно использующие силикатно-никелевые (латеритные) месторождения в процентном отношении к другим генотипам месторождений

1 – Австралия и Океания – тропические острова Тихого океана; 2 – Юго-Восточная Азия – Южный Китай, Вьетнам, Ньяса, Индия; 3 – Евразия – страны Средиземноморского бассейна, Иран; 4 – Северная Америка – шт. Техас, острова Карибского бассейна; 5 – остальные страны в Центральной Америке и Украине (Правдинское месторождение); 6 – Бразилия. Ранжировано по расчету программы Excel, данные выбраны по [30; 31]

Суммарные глобальные расходы на геологоразведочные работы по металлам для РМУМ за 2013 г. [31]

Регионы земного шара	Cu		Ni		PGE	
	млн долл.	% от Вг*	млн долл.	% от Вг*	млн долл.	% от Вг*
Всего глобальные расходы	3465		597		120	
Африка	539	16,1	48	8,0	78	64,8
Евразия	459	13,3	139	23,2	2	1,7
Северная Америка	615	17,7	103	17,3	32	26,6
Центральная Америка	45	1,28	11	1,8	0	00
Океания	452	13,0	199	33,3	4	3,0
Юго-Восточная Азия	186	5,36	52	8,7	0	00
Южная Америка	1150	33,2	46	7,6	5	3,9

* Вг – всего глобальные расходы.

островах Карибского бассейна (Куба, Доминиканская Республика) и Юго-Восточной Азии (Новая Каледония, Индонезия, Филиппины). Все эти латеритовые месторождения не являются докембрийскими, поэтому в нашем исследовании не рассматриваются детально. Их экономические данные приведены для сравнения, потому что на сегодня для ряда стран они наиболее выгодны по добыче руды и производству металлов.

Глобальная продукция металлов. Относительный размер каждого потребительского рынка металлов может быть измерен ежегодным горным (рудничным) производством, которое в большинстве случаев отвечает глобальным требованиям. В табл. 3 приведены оценки количества и стоимости рудничной продукции для потребителей РМУМ. Общая мировая стоимость металлов и минералов, добытых из разных месторождений, насчитывала на 2013 г. приблизительно 1 трлн долл. [33], из которого только 73 млрд долл. приходилось на металлы из РМУМ. Глобальная продукция меди в 2013 г. составляла 132 млрд долл., из которых лишь 4,6 млрд долл., или 3,5 % приходилось на извлеченные из РМУМ.

Используя информацию, приведенную в табл. 3 и горнорудных материалах [29; 30], установили, что в 2013 г. из РМУМ извлечено металлов (в %): Ni – 100, PGE – 100 и Cu – 3,5. Из месторождений РМУМ производители извлекли металлов на стоимость для никеля в 33 млрд долл., а платиноидов – 14 млрд долл. Мировая силикатно-никелевая латеритовая продукция преобладает на островах Океании и Западной Австралии – 26 и в Юго-Восточной Азии – 24 %. В других регионах меньше: в Евразии – 19 и Северной Америке – 14 %. Никелевая рудная продукция в Южной Америке (главным образом в Бразилии – 8 %) значительно возросла за последние годы за счет добычи из средних и высокосодержащих металлы руд латеритных месторождений (рис. 2). Горнорудная добыча меди из

сульфидных РМУМ преобладает в Евразии – 61 и в Северной Америке – 32 %, отражая географическое пристрастие к РМУМ производителей в Северном полушарии. В противоположность этому производители платиноидной продукции сосредоточены в основном в Южной Африке – 80 % на комплексе Бушвелд с возрастающей добычей из Великой Дайки в Зимбабве. Палладий, который является обычным би-продуктом из месторождений Cu-Ni-PGE сульфидных руд, показывает равное производство из месторождений Африки – 45 и Азии – 40 % (главным образом за счет месторождений Норильско-Талнахской группы и PGE из массива Кондёр в Восточной Сибири – но они не докембрийского возраста, так что большая часть докембрийских месторождений PGE находится в Африке), меньше по запасам, но значительные по производству платиноидов располагаются в Северной Америке (рудники Стиллуотер и Дулут) – 5 %.

Оценка проектов геологоразведочных работ. Другой важный аспект оценки рыночного состояния РМУМ – направления геологоразведочных работ (ГГР). Несмотря на трудность предсказания рыночных тенденций разведочных работ, такая оценка по Cu, Ni и платиноидам может быть сделана с опорой на инвестиции в этот вид работ по отчетам и бизнес-информации горнорудных компаний [30; 31]. Таблица 4 представляет обобщенные результаты для отдельных регионов земного шара оценок стоимости геологоразведочных работ по Cu-Ni-PGE проектам.

Глобальное распределение расходов по разведочным работам РМУМ на никелевые проекты показывает, что они были сосредоточены на регионах: острова Океании + Австралия (199 млн долл.), Евразии (139 млн долл.) и Северной Америки (103 млн долл.), а также малыми долями в Юго-Восточной Азии, Южной Америке и Африке. Для платиноидов разведочные расходы были на Африканских проектах (78 млн долл.),

Сравнительная оценка стоимости проектируемых расходов геологоразведочных работ на РМУМ и горной продукции, произведенной в 2013 г. [30; 31]

Металлы	Расходы на проектируемые ГРР, млн долл.	Стоимость продукции, млн долл.	Процент стоимости расходов от стоимости продукции
Медь	3465	132 404	2,62
Никель	597	33 188	1,80
Платиноиды	120	13 997	0,60

приходящихся главным образом на комплекс Бушвелд. Несмотря на значительные ресурсы платиноидов в докембрии Фенноскандии и севере России (Монча-Печенга), расходы на разведочные проекты в Евразии были ограничены 32 млн долл. в 2013 г. Глобальные затраты на проектируемые ГРР по платиноидам, достигавшие исторического максимума в 300 млн долл. в середине 2000-х годов, к 2013 г. упали до 120 млн (табл. 5). Падение стоимости проектируемых ГРР на платиноиды было, вероятно, вызвано решением правительства ЮАР о предпочтении таких инвестиций только для африканских предпринимателей.

Для того чтобы оценить стоимость разведочных инвестиций по никелю (\pm меди), включая сульфидные и латеритные проекты, ежегодные траты по регионам сравнили со стоимостью рудничной продукции в них же в 2013 г., которая была примерно 132 млрд долл., а медных разведочных проектов – около 3,5 млрд, или 2,6 % мировой продукции меди (табл. 5). Эти цифры отражают мировую рыночную стоимость этих товаров.

Аналитическое рассмотрение экономики (предложения и спроса, производства и стоимости) РМУМ продукции (Cu, Ni, Pt-Pd). Обзор проведен для анализа геологического контроля распространенности такого типа месторождений в мировых рудоносных структурах, а также их стоимостной базы проектов разведки. Эти данные обсуждаются с точки зрения ресурсов никеля и меди на протяжении нескольких десятилетий [22; 23; 33]. В случае месторождений никеля глобальные резервы и ресурсы были оценены в 300 млн т на период длительности добычи на протяжении более 100 лет при ее скорости в 1,9 млн т в год [22]. Для меди глобальные резервы и ресурсы были оценены в 1,8 и 2,2 млрд т с использованием глобального роста добычи меди с 1950 по 2010 г. по крайней мере на 60 лет [23]. Подобная точка зрения может быть представлена для платиноидных ресурсов с использованием глобальных запасов, представленных в табл. 1–3, 5 вместе со ссылками на более ранние работы [11; 21]. Между 2005–2008 гг. произошла существенная корректировка рыночных цен на металлы РМУМ. Новые цены первой ввела КНР почти для всех металлов и промышленных мине-

ралов. Эти цены, возможно, определялись также упрощением градаций добычи этих металлов и возрастанием современных методов их извлечения из рудничной продукции [23; 32].

Никель по-прежнему остается главным компонентом в сталелитейном производстве и поэтому тесно связан с экономикой его производства. Глобальное производство никеля из латеритных месторождений (т. е. силикатных никелевых месторождений, а не из сульфидных магматических, как Печенга или Норильск-Талнах в России и др. странах) стало преобладающим. Заглядывая вперед, можно сказать, что латеритные ГРР проекты будут более ценными, чем сульфидно-никелевые. Несмотря на потребности никелевых рынков, наблюдался излишек никелевого металла (на март 2015 г. более 400 000 т никелевого металла, по данным [<http://www.lme.com/metals/non-ferrous/nickel>]). Такой излишек означал высокую цену на крупномасштабное латеритное никелевое месторождение Онка-Пума на севере Бразилии и первое такое месторождение (Равенсторп), обнаруженное в Западной Австралии.

В связи с крупными объемами продукции, добываемой из латеритных месторождений, и современными технологическими процессами извлечения металлов – пирометаллургическими и гидрометаллургическими фабриками – возросла конкурирующая сеть добычи би-продуктов из латеритных руд и установились более низкие цены на них, по сравнению с исторически используемыми для сульфидных месторождений. Продолжающееся повышение качества технологической обработки латеритной продукции должно было понизить экономические градации, требуемые для латеритных силикатно-окисных (сапролитовых) месторождений. Пирометаллургическое оборудование, используемое для переработки сапролитовых латеритных никелевых руд, работает при высоких температурах и позволяет перерабатывать большие объемы руды, в отличие от сульфидно-никелевых. Это привело к тому, что использование латеритных руд потребовало привлечения близлежащих источников энергии – гидроэлектростанций или их удобных конструкций – как, например, в Бразилии, Юго-Восточной Азии и Новой Каледонии.

Текущий рынок PGE сейчас преобладает для руд из ЮАР, но наблюдается некоторая тенденция

в этом изменении. Общая цена на PGE, установленная на 2013 г., включающая горнорудную продукцию и возрастающее количество вторичных продуктов при ее обработке каталитическими конвекторами, оценивается в 20,5 млрд долл. [26], причем производство PGE продукции требует значительных вложений в экономику. Глобальные платиноидные рынки испытали избышек платиновой продукции в 2014 г., который мог быть вызван длительным периодом использования палладия вместо платины для производства высокосортного бензина нефтеперегонными заводами. Постоянное использование ранда ЮАР вместо доллара США вполне возможно приведет и в дальнейшем к появлению излишков платины на мировом рынке из-за использования платиновых руд комплекса Бушвелд или других производителей только платины.

В противоположность этому палладиевые рынки развивались с дефицитом этого сырья, что было оценено в минус 700 000 унций, или около 10 % отсутствия этого металла на рынке [16] и стало причиной роста рынка до 1,6 млн унций в 2014 г. [<http://www.platinum.matthey.com/service/market-research/may-2014>].

Несмотря на фундаментальные рыночные основы, палладию придается мало значения в сведениях, получаемых из текущих горнорудных проектов. Эта продукция хороша для палладиевых производителей, например России. Российское палладиевое производство включает крупную и стабильную добычу палладия на Таймырском сульфидном медно-никелевом ГКМ «Норильский никель» с варьирующим количеством палладия в рудах [<http://www.bloomberg.com/news/articles/2010-05-19/>]. Реальностью PGE рынков является колебание цен на каждый отдельный металл (платину, палладий, родий), показывающее неустойчивость их стоимости, проявленную за последние два десятилетия [<http://www.kitco.com/charts/>]. Дополнительный и недавно возникший риск для глобального рынка PGE – поведение появившихся товарных обменно-торговых фондов (ОТФ), возможно тормозящих вещественные количества металлов на рынках [16]. Платиновые и палладиевые ОТФ могут сдерживать инвесторов от прямых выставлений цен на PGE через ограничение покупок и продаж металлов, которые идут через ОТФ. Так, в 2014 г. сдерживание Pt и Pd достигало до

Таблица 6

Ранжированные по степени никеленосности докембрийские сульфидно-рудноносные пояса, комплексы и фанерозойские (офиолитовые) латеритовые провинции

Докембрийские рудоносные пояса и фанерозойские провинции	Регионы мира	Страны, районы
Офиолитовая провинция Юго-Восточной Азии – л.	Юго-Восточная Азия	Индонезия, Филиппины
Провинция Йилгарн – л. и рудные пояса	Австралия	Западная Австралия
Карибская провинция офиолитов – л.	Центральная Америка	Колумбия, Куба, Венесуэла
Рудный пояс Садбери	Северная Америка	Канада
Офиолиты Новой Каледонии – л.	Океания	Новая Каледония
Рудный пояс Бушвелд	Африка	ЮАР
Печенгский рудный пояс	Евразия	Россия
Провинция Гансу – л.	Евразия	КНР
Рудный пояс Кайарас, провинция – л. и сульфидные месторождения	Южная Америка	Бразилия
Средиземноморские провинции офиолитов – л.	Евразия	Греция, Сербия, Турция, Албания
Восточно-Австралийская провинция – л.	Австралия	Австралия
Рудоносные пояса Европы	Европа	Россия, Финляндия
Пояс Войсис-Бэй	Северная Америка	Канада
Граничный рудоносный пояс провинции Сьюпириор	Северная Америка	Канада
Рудоносные пояса Кибарийский и Зимбабве	Африка	Танзания, Зимбабве

Примечание: л. – латериты.

**Никелевая продукция и стоимость в докембрийских поясах
сульфидных РМУМ и латеритовых месторождений
фанерозойских провинций [22; 30]**

Пояса и провинции	Продукция Ni в 2012 г, т	Продукция Ni до 2012 г, т	Ресурсы и запасы Ni, т	Вклад Ni, т	Стоимость Ni, млн долл.
Офиолитовая провинция Юго-Восточной Азии – л.	527 169	3 400 000	44 100 000	48 027 169	720 740
Провинция Йилгарн – л.	44 528	290 000	25 000 000	25 334 558	380 794
Карибская провинция – л.	91 908	3 400 000	21 000 000	25 207 000	367 548
Рудный пояс комплекса Садбери	99 157	18 700 000	3 151 000	21 950 157	329 404
Офиолиты провинции Новой Каледонии – л.	185 460	4 500 000	15 000 00	19 685 460	295 418
Комплекс Бушвельд	79 189	500 000	12 400 000	12 979 189	194 778
Печенгский сульфидный пояс	53 100	2 400 000	5 500 000	6 930 000	103 998
Провинция Гансу, КНР – л.	60 000	1 370 000	6 800 000	6 806 000	102 137
Кайарас – латеритовая провинция и пояс Бразилии Байа	6 000	Неизвестно	5 220 000	5 664 799	85 011
Средиземноморский пояс офиолитов – л.	44 709	400 000	4 400 000	4 503 000	72 032
Рудоносные пояса Северной Европы	45 518	222 000	3 528 000	3 795 518	56 959

3 млн унций. Аспекты развития проектируемой геологоразведочной стратегии сосредоточены в основном на оценке новых экономических подходов к мощностям и размерам ресурсов. Например, в применении СНВ в зависимости от цены на комбинацию резервов, ресурсов и скорости обработки продукции для никелевого производства, которая приводит к разделению проектов ГРП на привлекательные и передовые. Предлагаемые области для передовых проектов разведки месторождений рассматриваются для сульфидных Cu-Ni-PGE месторождений, где самые высокие СНВ цены почти всегда ассоциируют с разведочными проектами открытых (карьерных) способов добычи (40 долл./т руды). Текущие цены (см. табл. 1) – это минимальные СНВ цены для никеля – 0,4 %, меди – 0,8 %, платины – 1,5 г/т. Латеритные проекты и проекты разработок близповерхностных сульфидных месторождений оцениваются в 70 долл./т руды и считаются привлекательными. Текущие цены – это минимум цены снижения налогового возврата для никелевого эквивалента – 0,7 %, медного – 1,4 % и платинового – 2,5 г/т. Сульфидные месторождения с подземной разработкой могут считаться экономически выгодными для проектируемых ГРП с малыми запасами (менее 1 млн т обработки руды в год) и СНВ ценой до 500 долл./т и пятипроцентным никелевым эквивалентом. Некоторые подземные сульфидные рудники могут иметь в ГРП проектах сходные градации с латеритными месторождениями

из-за того, что предполагают разведку в районах с известными крупными месторождениями, как Садбери или Норильск [24]. Считается, что из никелевых сульфидных проектов целесообразно поддерживать как экономически выгодные для ГРП только те, которые являются предельно крупными или предельными по грациям. В противоположность этому латеритовые проекты могут быть экономически выгодными для ГРП, если они представляют объекты с гораздо большими значениями в среднем по стоимости СНВ и грациям, поддержанным ресурсами и запасами с продукцией, большей, чем 100 млн т. Приемлемыми считаются те проектируемые месторождения, у которых стоимость продукции может достигать более 50 долл./т.

Главные рудоносные пояса для РМУМ продукции. Обычно в качестве основных отмечают рудоносные пояса, например район медных месторождений в Андах [29]. Но в настоящей статье рассмотрены районы распространения сульфидных рудных месторождений (Cu, Ni, PGE) РМУМ докембрийского возраста, поскольку они разнообразнее по вещественному составу руд и магматизму [4]. В табл. 6 приведено сравнение ведущих *поясов* распространения докембрийских сульфидно-никеленосных месторождений и значимых фанерозойских латеритовых провинций.

Цифры никелевой продукции, приведенные в табл. 7, были оценены по публикации [30],

сравнены с данными [22] в терминах ценности регионов, в которых были сделаны вклады никелевых открытий. Ресурсы никеля ориентировочно разделены на две части – докембрийские сульфидно-рудные пояса и фанерозойские латеритные провинции. По географическому распространению мировые ресурсы никеля исторически преобладают в главных рудоносных поясах Северного полушария по сравнению с латеритными провинциями, распространенными в Юго-Восточной Азии и Южной Америке, имеющими почти двойное превосходство в количественном содержании никеля.

Эти провинции распространены на площадях, близких по отношению к современному экватору, где естественно развивается тропический характер выветривания никеленосных (и сопровождающих его Cu и PGE минерализованных) магматических тел и формирование латеритного типа месторождений. Исключением из такого географического положения являются:

1 – провинция Йилгарн в Западной Австралии, где, наряду с известными сульфидными докембрийскими месторождениями, присутствуют многочисленные современные латеритные мелкие никелевые месторождения;

2 – провинции и пояса вокруг Бразильского кратона, где, например, расположено докембрийское сульфидное Cu-Ni и современное латеритное месторождение Кайарас [14] (см. табл. 6).

По общему содержанию металлов докембрийские Cu-Ni-PGE сульфидные месторождения Южной Африки, Северной Америки, Западной Австралии и севера Евразии преобладают в мировых ресурсах. Историческое время открытий Cu-Ni-PGE сульфидных месторождений и их использование происходило в начале-середине XX века [24] с разной ценностью этих находок. Исключительным является время находки крупного Cu-Ni-PGE сульфидного месторождения Войсис-Бэй в Канаде в последние два десятилетия XX века [25].

В 2000-е годы никелевые компании обратили внимание на разведку никелевых месторождений в удаленных областях известных рудоносных районов в западных и центральных регионах Африки, в северных областях Канадской Арктики, береговых районах Гренландии, Северном и Дальнем Востоке России.

Не оставлены были без внимания также западные и северные части Китая, внутренние части Австралийского континента и удаленные регионы северной и западной областей Бразилии. Несмотря на высокую вероятность, было сделано очень мало обнадеживающих находок. Некоторым небольшим исключением является обнаружение Cu-Ni сульфидного месторождения Санта-Рита в штате Байа, Бразилия [9] и Cu-Ni-Co сульфидных месторождений на хребте Фазер, Западная Австралия [<http://siriusresources.com.au/>]. Падение цен на это сырье привело к остановке интересов к разведочным проектам на сульфидно-никелевые месторождения.

При сохраняющемся ценовом базисе PGE ресурсы, вмещаемые комплексом Бушвелд и Великой Дайкой в Южной Африке, могли бы быть привлекательными для большинства инвесторов разведочных проектов. Тем не менее отсутствие инвесторов в разведочные проекты для PGE означает, что новые открытия маловероятны, несмотря на перспективность природы многих ультрамафит-мафитовых поясов и возрастание понимания геологических процессов, ведущих к концентрации PGE и Cu, Ni в магматических сульфидных месторождениях [7].

Рекомендации к методике проведения геологоразведочных и поисковых работ на РМУМ.

В областях, где осуществляется поиск и разведка на сульфидные медно-никелевые и платинометалльные месторождения, должны быть использованы специальные полевые магнитные и гравитационные исследования, в которых преобладают электромагнитные наблюдения, алмазное бурение, скважинное геофизическое обслуживание и литогеохимическое опробование. При нахождении богатых PGE месторождений привлекался шлиховой метод поисков концентраций платиновых минералов, устанавливался их источник из магматических тел, а также использовались стратиграфические перерывы. Геофизические методы могут быть использованы прямо при определении платиновой минерализации в образцах или косвенными методами, например при обнаружении магнитных или сейсмоаномалий.

Можно привести примеры, которые необходимо учитывать при планировании поисково-разведочных работ на РМУМ:

– интрузии, вмещающие стратиформные PGE месторождения рифового типа, обычно не перспективны на массивные сульфидные медно-никелевые месторождения, сопровождающиеся таким оруденением (месторождение Панские тундры на Кольском полуострове [3] или известное месторождение Платриф в комплексе Бушвелд, Южная Африка [17]);

– стратиформные магматические сульфидные медно-никелевые месторождения могут не обладать подходящими размерами запасов в проектируемом для разведки регионе, но должны сопровождаться еще рядом месторождений, которые дадут возможность их совместной рентабельной разработки (месторождение Дулут, США или Санта-Рита, Бразилия [9]);

– обстановки тектонического сжатия являются неблагоприятными для возможных вместилищ сульфидных Cu-Ni-PGE месторождений РМУМ, которые тяготеют к рифтовым обстановкам тектонического растяжения [4].

Другими общими задачами, стоящими перед оценщиками расходов на геологоразведочные привлекательные проекты, могут быть более локальные оценки:

– литогеохимическое определение пригодности магматической ассоциации для сульфидных Cu-Ni-PGE месторождений;

– выборочное картирование распространенных индикаторных минералов, особенно в постгляциальных районах;

– отбор районов распространения возрастных определений специфичных магматических провинций или дискретных магматических эпизодов внутри этих провинций;

– изучение ранних исследований, примененных к выбранному району и пригодных для сульфидного Cu-Ni-PGE оруденения магматической ассоциации.

Так, например, в Африке Каапваальский кратон содержит многочисленные сульфидные Cu-Ni-PGE месторождения, ассоциированные с комплексом Бушвелд, но также подобная минерализация сопровождается его сателлитовые тела, например комплекс Юитт. Таким образом, это демонстрирует, что в менее изученных частях известного комплекса Бушвелд еще могут быть сделаны рудные открытия PGE металлов такие, как проект Ватерберг [<http://platinumgroupmetals.net/>]. По этим материалам, Зимбабвийский кратон вмещает несколько сульфидных медно-никелевых небольших месторождений, локализованных в архейских зеленокаменных поясах в горнорудном районе Великой Дайки. Далее к северу от него никель-сульфидные и никель-латеритные месторождения находятся в аркообразном поясе, окружающем с запада и юга регион Танзанийского кратона.

В докембрийских структурах Северной Европы, занятой Фенноскандинавским щитом, протерозойские и архейские магматические провинции вмещают сульфидные Cu-Ni-PGE месторождения в Центральной и Северной Финляндии (пояса Коталахти-Ваммала и Пенникат-Портимо) и крупные месторождения на Кольском полуострове в России – Мончегорский и Печенгский рудные районы. Но вот меридионально вытянутый огромный Уральский регион России содержит исключительно фанерозойские магматические рудные месторождения PGE, сульфидные никелевые, а также медные и латеритные никелевые [15]. Знаменитые и богатейшие Cu-Ni-PGE месторождения Северной Сибири (Таймырский регион) по возрасту также принадлежат фанерозойской группе, как и крупное платино-металльное месторождение Кондёр в Южной Сибири [2].

Северо-Американский континент представлен крупнейшими докембрийскими Cu-Ni-PGE месторождениями (в противоположность Северо-Сибирским фанерозойским месторождениям), включающими проявления горнорудного района Садбери (Канада), Войсис-Бэй (Канада) [25], пояса Раглан в Северном Квебеке [20], никелевого пояса Томпсон в провинции Манитоба [18] и комплекса Стиллиуотер (шт. Монтана, США). Известные области РМУМ распространены в гранит-зеленокаменном поясе Абитиби. Подобные магматические провинции архей-протерозойского возраста распространены также и в других внутриконтинентальных районах Северной

Америки: северо-западных частях провинций Онтарио и Сьюпириор в Канаде, в штатах Миннесота, Монтана и Вайоминг в США.

На южном, Австралийском, континенте Восточного полушария провинция Йилгарн вмещает значительные ресурсы докембрийских сульфидно-никелевых руд, а в тропической его части также и латеритных. В центральной части континента провинция Масгрейв характеризуется протерозойскими сульфидными Cu-Ni-PGE месторождениями, а в восточных провинциях неопротерозойско-фанерозойские структурные пояса содержат локальные ультрамафит-мафитовые интрузии с сульфидным Cu-Ni-PGE оруденением и приуроченные к ним латеритные малые месторождения [27].

Использование концепции принадлежности большинства сульфидных РМУМ к магматическим провинциям континентов подтверждается на примерах архей-протерозойских тектонических структур: архейские гранит-зеленокаменные области обычно вмещают крупные сульфидные РМУМ, часто – протерозойские месторождения, и известны как вместилища мезотермальных золоторудных месторождений [28] и массивных вулканогенных сульфидных месторождений [13]. С мезо-протерозойскими мафит-ультрамафитовыми магматическими провинциями ассоциируют внутриконтинентальные докембрийские домены, как, например, в США комплекс расчлененных интрузий Дулут, где были обнаружены Cu-Ni-PGE ресурсы, или богатые сульфидным никелем проявления в районе рудника Игл Майн в шт. Мичиган [12].

При многолетнем изучении и поисково-разведочных работах на севере Фенноскандинавского щита были обнаружены новые Ni-PGE сульфидно-рудные тела в пределах давно известных Печенгского (рудник Южный) и Мончегорского (месторождение PGE Фёдорово-Панских тундр) горнопромышленных районов.

Каждый из перечисленных регионов и близлежащих, скрытых молодыми покровами докембрийских доменов, в высокой степени потенциален для проведения дальнейших разведочных работ с целью выявления экономически и экологически благоприятных добычных условий. К ним принадлежит подобный тип латеритных (с Cu, Ni, PGE) современных месторождений, источником металлов в которых были Cu-Ni-PGE месторождения в протерозойских рифтогенных поясах. Следовые отпечатки металлов этих месторождений обнаружены при разведке латеритовых профилей выветривания в Бразилии, где открыты сульфидные Cu-Ni-PGE месторождения Санта-Рита в шт. Байя [9] и рудоносный ультрамафитовый комплекс Никеландия в шт. Гояс.

Месторождения древнего (не современного) латеритного выветривания редки и не встречались еще в литературных описаниях, но вполне могут быть в природе. Одним из таких объектов являются рассыпающиеся «прослои» магматических пород («прослои» серпентинитов

с сульфидной минерализацией среди расслоенной серии перидотит-габброноритов), обнаруженные в ядрах буровых скважин крупнейшей в Европе расслоенной Бураковско-Аганозерской палеопротерозойской интрузии (U-Pb по циркону и Sm-Nd изохронный возраст соответственно $2449,0 \pm 1,1$ и 2365 ± 100 млн лет [5]), превращающиеся при их выемках в песчанистый материал, состоящий из лизардита, никелистого клинохлорита и нонтронита, актинолита, антофиллита, сульфидов железа и сапролита. Возможно, эти рассыпающиеся породы — продукты древнего латеритного выветривания и могут представлять интерес как силикатные никель-магнезиальные промышленные руды (об этом сообщал еще в 1968 г. А. Ф. Горошко [1], применяя к ним название кемиститов, а по генезису — метасоматитов).

После установления районов проведения геологоразведочных работ и вида РМУМ, которые предполагается добывать, рекомендуется исследовать выбранный регион с помощью следующих методологических приемов:

1 — Региональное привлечение целевых анализов 2D- и 3D-потенциальных полевых (гравитационных, магнитных) и данных геохимических служб (например, по потокам рассеивания и почвам), чтобы определить ширину и глубину залегания целевой магматической провинции, размещение благоприятных структурных позиций корового масштаба, на которых могут быть сконцентрированы тепловые и магматические аномалии мафит-ультрамафитового мантийного магматизма.

2 — Оценка известных стилей минерализации, которые могут быть встречены, для определения стоимости разведочных работ, включая аэро- и наземные магнитометрические исследования, электромагнитные высокочувствительные и гравитационно-сейсмометрические наблюдения, детальное изотопно-геохимическое изучение и прецизионное бурение, литологическое и структурное картирование отдельных площадей, с целью подтверждения существования перспективных типов пород и структур.

3 — Литогеохимическое опробование и векторизация обнажений и отобранных образцов кернов. Современные аналитические методы значительно убыстрили и уточнили анализируемые данные и понизили стоимость их получения. Теперь доступны свинцово-изотопные методы изучения вещества, выявления U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr и других геохимических аномалий для определения возрастных последовательностей формирования породных рудоносных комплексов, а также содержаний платиноидов и концентрации сопутствующих им химических элементов As, Te, Bi, Sb и др., помогающих в установлении путей их миграции и соответственно характера магматических рудных месторождений.

4 — Системное и целенаправленное бурение, которое приводит к благоприятному разрешению поставленных задач на поиски рудных месторождений в предполагаемых ультрамафит-мафи-

товых провинциях, особенно сопровождаемое геофизическим и геохимическим изучением площадей в этих провинциях.

Совокупность всех этих приемов дает возможность правильно оценить стоимость геологоразведочных работ на выбранной территории. Типы рудных месторождений в таких провинциях могут быть представлены: офиолитовыми поясами с подиформными хромититами и никель-кобальт-PGE латеритными месторождениями; субвертикальными дайкообразными телами как подводными рудными каналами (с Cu-Ni-PGE сульфидными месторождениями); контактовыми рассеянными или массивными Cu-Ni-PGE сульфидными месторождениями; стратабаундовыми рифового типа PGE, а также несогласными поздними трубообразными Cu-Ni-PGE сульфидными месторождениями.

Заключение. Рассмотренные выше типы РМУМ насчитывают около 7 % от общего объема мировой добычи металлов и минералов, произведенной в 2013 г., что в денежном эквиваленте приблизительно составляет около 70 млрд долл. По исторической и современной стоимости минеральной добычи РМУМ ведущими являются докембрийский комплекс Бушвелд (3,6 трлн долл.), палеозойско-мезозойский Норильско-Талнахский сульфидно-рудный район (1,3 трлн долл.) и современный Индонезийский архипелаг латеритовой добычи (0,7 трлн долл.). Оказалось, что по стоимости добычи минерального сырья из мировых недр (в особенности, если привлечь более низкостоймые современные латеритные типы) географическое расположение РМУМ не очень зависит от возраста геологических комплексов, их вмещающих, учитывая генетический тип оруденения. Но все же по географической распространенности мировых центров добычи РМУМ преобладают месторождения в докембрийских рудоносных структурах, небольшое исключение из которых представляют медно-порфиновые месторождения Центрально-Андийского пояса. Это в общем соответствует истине, судя по продолжающейся золоторудной добыче в поясе Витватерсранд, меднорудных поясах Зимбабве в Африке и новых сульфидных Cu-Ni-PGE рудоносных структурах Карайас в Бразилии.

Значительно увеличилась стоимость продукции районов РМУМ в связи с возросшей стабильностью и размером ключевых потребностей рынков на Ni, Cu, PGE, а также вкладов на разведочные инвестиции в мировые мафические и ультрамафические магматические провинции и области их возможного тропического выветривания.

Всестороннее понимание рыночных потребностей на Cu, Ni, PGE считается первым шагом для поисково-разведочных работ и развития эффективной стратегии этого направления в поисках новых открытий в магматических провинциях. Выявление минеральных районов, благоприятных

для создания инвестиционных проектов, — следствие такого понимания.

Текущий спрос и предложение экономически благоприятны для большинства металлов и минералов, добываемых из рудных месторождений магматических провинций. Надежные и долгоживущие связи таких металлов, как медь, никель и металлы платиновой группы элементов, еще надолго определяют направленность разведки и их добычи в благоприятных магматических центрах. Сопроводительные аналитические данные к настоящей статье можно найти в источнике [25].

Работа выполнена при финансовой поддержке темы FMUW-2022-0004

1. Горошко А. Ф. Новый геолого-промышленный тип месторождений комплексного никель-магнезиального сырья в ультрамафитах Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. — Вып. 1. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1968. — С. 24—35.

2. Мочалов А. Г., Якубович О. В., Бортников Н. С. ^{190}Pt – ^4He -возраст платинометалльных рудопоявлений щелочно-ультраосновного массива Кондёр (Хабаровский край, Россия) // Докл. РАН, 2016. — Т. 469. — № 5. — С. 602–606.

3. Турченко С. И. Природа платинометалльного оруденения в палеопротерозойской расслоенной интрузии Панских тундр (Кольский полуостров) // Платина России: Сборник научных трудов. — Красноярск: Типография «Знак», 2011. — Т. VII. — С. 395–405.

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

5. Amelin Yu. A., Heaman L. M., Semenov V. S. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implication for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // Precambrian Research. — 1995. — Vol. 75. — Pp. 31–46.

6. Ames D. and Farrow C. E. G. Mineral deposits of Canada — A synthesis of major deposit types, District Metallogeny, The evolution of geological provinces and explorations of methods. — Geological Association of Canada. Mineral Deposits Division. Special Publication. — 2007. — No. 5. — 350 p.

7. Arndt N. T., Leshner C. M., Chamanske G. K. Mantle-derived magmas and Ni-Cu-(PGE) deposits // Economic Geology. — 2005. — Vol. 100. — Pp. 5–24.

8. Barnes S. J. Komatiite-hosted nickel sulphide deposits: Geology, geochemistry, and genesis. — Society of Economic Geologists. Special Publication. — 2006. — No. 13. — Pp. 13–56.

9. Barnes S. J. The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil: geology, sulfide geochemistry and genesis / S. J. Barnes, G. A. Osborn, D. Cook, L. Barnes, W. D. Maier, B. Godel // Economic Geology. — 2011. — Vol. 106. — Pp. 1085–1110.

10. Canadian Institute of Mining. Definition standards for mineral resources and mineral reserves // CIM Standing Committee on Reserve Definition. — 2010. — 10 p.

11. Cawthron R. G. Platinum group element, chromium and vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks / R. G. Cawthron, S. J. Barnes, C. Ballhaus, K. N. Malitch // Economic Geology. — 2005. — Vol. 100. — Pp. 215–250.

12. Ding X., Ripley E. M., Li C. PGE geochemistry of the Eagle Ni-Cu-(PGE) deposit, Upper Michigan: constraints on ore genesis in a dynamic magma conduit // Mineralium Deposita. — 2012. — Vol. 47. — Pp. 89–104.

13. Franklin J. M. Volcanogenic massive sulfide deposits / J. M. Franklin, H. L. Gibson, I. R. Johansson, A. G. Galley // Economic Geology. — 2005. — Vol. 100. — Pp. 523–560.

14. Grainger C. J. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralization / C. J. Grainger, D. I. Groves, F. H. B. Tallarico, I. R. Fletcher // Ore Geology Reviews. — 2008. — Vol. 33. — Pp. 451–489.

15. Herrington R. J. Mineral deposits of the Urals and links to a geodynamic evolution / R. J. Herrington, V. V. Zaykov, V. V. Maslennikov, D. Brown, V. N. Pushkov // Economic Geology. — 2005. — Vol. 100. — Pp. 1069–1096.

16. Johnson Matthey: [Электронный ресурс] // Platinum 2013. Interim Review. — 2013. — 40 p. — URL: <https://platinum.matthey.com/> (дата обращения: 16.03.2022).

17. Kinnaird J. A. Petrology and mineralization of the southern Platreef: northern limb of the Bushveld Complex, South Africa / J. A. Kinnaird, D. Hutchison, L. Shurmann, P. A. M. Nex, R. de Lange // Mineralium Deposita. — 2005. — Vol. 40. — Pp. 576–597.

18. Layton-Matthews D. Magmatic Ni-Cu-platinum group element deposit of the Thompson Nickel Belt, Mineral Deposits of Canada / D. Layton-Matthews, C. M. Leshner, O. N. Burnham, J. Liwang, N. M. Halden, L. Hulbert, D. C. Peck, W. Goodfellow // Geological Association of Canada. Special Publication. — 2007. — No. 5. — Pp. 409–432.

19. Laznicka P. Giant metallic deposits. Future sources of industrial metals. Second Edition. — Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010. — 949 p.

20. Leshner C. M. Ni-Cu-(PGE) deposits in the Regan area, Cape Smith Belt, New Quebec. Mineral Deposits of Canada // Geological Association of Canada. Special Publication. — 2007. — No. 5. — Pp. 351–386.

21. Mudd G. M. Global trends and environmental issues in nickel mining: sulfides versus laterites // Ore Geology Reviews. — 2010. — Vol. 38. — Pp. 9–26.

22. Mudd G. M. and Jowitt S. M. A detailed assessment a global nickel resource trends and endowments // Economic Geology. — 2014. — Vol. 109. — Pp. 1813–1841.

23. Mudd G. M., Weng Z., Jowitt S. M. A detailed assessment a global Cu resource trends and endowments // Economic Geology. — 2013. — Vol. 108. — Pp. 1163–1183.

24. Naldrett A. J. Magmatic sulfide deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. — Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004. — 727 p.

25. Naldrett A. J. and Li C. The Voisey's Bay Deposit, Labrador, Canada // Mineral deposits of Canada. 2007. A synthesis of main deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces and exploration methods. Geological Association of Canada. Special Publication. — No. 5. — Pp. 387–408.

26. Orgogozo L. An open source massively parallel solver for Richards equation: mechanistic modelling of water fluxes at the watershed scale / L. Orgogozo, N. Renon, C. Soullaine, F. Hénon, S. K. Tomer, D. Labat, O. S. Pokrovsky, M. Sekhar, R. Ababou, M. Quintard // ResearchGate GmbH. — 2008–2022. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.004> (дата обращения: 16.03.2022).

27. Piranjo F. and Hoatson D. M. A review of Australia's Large Igneous Provinces and associated mineral systems: implications for mantle dynamics through geological times // Ore Geology Reviews. — 2012. — Vol. 48. — Pp. 2–54.

28. Robert F. Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons / F. Robert, H. K. Pulsen, H. F. Cassidy, C. J. Hodgson // Economic Geology. — 2005. — Vol. 100. — Pp. 1001–1034.

29. Sillitoe R. H. and Perello J. Andean copper province: tectono-magmatic settings, deposit types, metallogeny,

exploration and discovery // *Economic Geology*. – 2005. – Vol. 100. – Pp. 845–890.

30. SNL Metals and Mining: [Электронный ресурс] // Online Mineral Resources Database as of April, 2014. – URL: https://www.snl.com/marketing/microsite/MEG/mm_pagetwo.html (дата обращения: 16.03.2022).

31. SNL Metals and Mining: [Электронный ресурс] // Online Database of Mineral Exploration Budget Trends for Copper, Nickel, Platinum, Palladium, Gold as of April, 2014. – URL: <https://investinrussia.com/data/files/sectors/Metals-and-Mining-in-Russia.pdf> (дата обращения: 16.03.2022).

32. Snow G. G. and Juuhas A. P. Trends and forces in mining and mineral exploration // Society of Economic Geologists. Special Publication. – 2002. – Vol. 9. – Pp. 1–16.

33. Tilton J. E. Depletion and the long-run availability of mineral commodities // *Economic Geology*. Special Publication. – 2006. – No. 12. – Pp. 61–70.

1. Goroshko A. F. Novyy geologo-promyshlennyy tip mesorozhdeniy kompleksnogo nikel'-magneziyal'nogo syr'ya v ul'tramafitakh Karelii [A new geological and industrial type of deposits of complex nickel-magnesian raw materials in ultramafic rocks of Karelia]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii*, iss. 1, Petrozavodsk, 1968, pp. 24–35. (In Russian).

2. Mochalov A. G., Yakubovich O. V., Bortnikov N. S. ^{90}Pt – ^4He age of PGE ores in the alkaline–ultramafic Kondyor massif (Khabarovsk district, Russia). *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 469, no. 5, pp. 602–606. (In Russian).

3. Turchenko S. I. Priroda platinometall'nogo orudeniya v paleoproterozoyskoy rassloennoy intruzii Panskikh tundr (Kol'skiy poluostrov) [The nature of platinum-metal mineralization in the Paleoproterozoic layered intrusion of the Pansky tundra (Kola Peninsula)]. *Platina Rossii: Sbornik nauchnykh trudov*. Krasnoyarsk: Tipografiya «Znak», 2011, vol. VII, pp. 395–405. (In Russian).

4. Turchenko S. I. Metallogeniya tektonicheskikh struktur paleoproterozoya [Metallogeny of Paleoproterozoic tectonic structures]. St. Petersburg, Nauka, 2007, 175 p.

5. Amelin Yu. A., Heaman L. M., Semenov V. S. U–Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implication for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting. *Precambrian Research*, 1995, vol. 75, pp. 31–46.

6. Ames D. and Farrow C. E. G. *Mineral deposits of Canada – A synthesis of major deposit types, District Metallogeny, The evolution of geological provinces and explorations of methods*. – Geological Association of Canada. Mineral Deposits Division. Special Publication, 2007, no. 5, 350 p.

7. Arndt N. T., Leshner C. M., Chamanske G. K. Mantle-derived magmas and Ni–Cu–(PGE) deposits. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, pp. 5–24.

8. Barnes S. J. *Komatiite-hosted nickel sulphide deposits: Geology, geochemistry, and genesis*. Society of Economic Geologists. Special Publication, 2006, no. 13, pp. 13–56.

9. Barnes S. J., Osborn G. A., Cook D., Barnes L., Maier W. D., Godel B. The Santa Rita nickel sulfide deposit in the Fazenda Mirabela intrusion, Bahia, Brazil: geology, sulfide geochemistry and genesis. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, pp. 1085–1110.

10. Canadian Institute of Mining. Definition standards for mineral resources and mineral reserves. *CIM Standing Committee on Reserve Definition*, 2010, 10 p.

11. Cawthron R. G., Barnes S. J., Ballhaus C., Malitch K. N. Platinum group element, chromium and vanadium deposits in mafic and ultramafic rocks. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, pp. 215–250.

12. Ding X., Ripley E. M., Li C. PGE geochemistry of the Eagle Ni–Cu–(PGE) deposit, Upper Michigan: constraints on ore genesis in a dynamic magma conduit. *Mineralium Deposita*, 2012, vol. 47, pp. 89–104.

13. Franklin J. M., Gibson H. L., Johansson I. R., Galley A. G. Volcanogenic massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, pp. 523–560.

14. Grainger C. J., Groves D. I., Tallarico F. H. B., Fletcher I. R. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralization. *Ore Geology Reviews*, 2008, vol. 33, pp. 451–489.

15. Herrington R. J., Zaykov V. V., Maslennikov V. V., Brown D., Pushkov V. N. Mineral deposits of the Urals and links to a geodynamic evolution. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, pp. 1069–1096.

16. Johnson Matthey. *Platinum 2013. Interim Review*. 2013. 40 p., available at: <https://platinum.matthey.com/> (accessed 2 March 2022).

17. Kinnaird J. A., Hutchison D., Shurmann L., Nex P. A. M., de Lange R. Petrology and mineralization of the southern Platreef: northern limb of the Bushveld Complex, South Africa. *Mineralium Deposita*, 2005, vol. 40, pp. 576–597.

18. Layton-Matthews D., Leshner C. M., Burnham O. N., Liwang J., Halden N. M., Hilbert L., Peck D. C. Magmatic Ni–Cu–platinum group element deposit of the Thompson Nickel Belt, Mineral Deposits of Canada. *Geological Association of Canada. Special Publication*, 2007, no. 5, pp. 409–432.

19. Laznicka P. *Giant metallic deposits. Future sources of industrial metals. Second Edition*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010, 949 p.

20. Leshner C. M. Ni–Cu–(PGE) deposits in the Regan area, Cape Smith Belt, New Quebec. Mineral Deposits of Canada. *Geological Association of Canada. Special Publication*. 2007, no. 5, pp. 351–386.

21. Mudd G. M. Global trends and environmental issues in nickel mining: sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, 2010, vol. 38, pp. 9–26.

22. Mudd G. M. and Jowitt S. M. A detailed assessment a global nickel resource trends and endowments. *Economic Geology*, 2014, vol. 109, pp. 1813–1841.

23. Mudd G. M., Weng Z., Jowitt S. M. A detailed assessment a global Cu resource trends and endowments. *Economic Geology*, 2013, vol. 108, pp. 1163–1183.

24. Naldrett A. J. *Magmatic sulfide deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004, 727 p.

25. Naldrett A. J. and Li C. The Voisey's Bay Deposit, Labrador, Canada. *Mineral deposits of Canada. 2007. A synthesis of main deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces and exploration methods*. Geological Association of Canada. Special Publication, 2007, no. 5, pp. 387–408.

26. Orgogozo L., Renon N., Soullaine C., Hénon F., Tomer S. K., Labat D., Pokrovsky O. S., Sekhar M., Ababou R., Quintard M. An open source massively parallel solver for Richards equation: mechanistic modelling of water fluxes at the watershed scale. *ResearchGate GmbH*. 2008–2022, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.004> (accessed 16 March 2022).

27. Piranjo F. and Hoatson D. M. A review of Australia's Large Igneous Provinces and associated mineral systems: implications for mantle dynamics through geological times. *Ore Geology Reviews*, 2012, vol. 48, pp. 2–54.

28. Robert F., Pulsen H. K., Cassidy H. F., Hodgson C. J. Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, pp. 1001–1034.

29. Sillitoe R. H. and Perello J. Andean copper province: tectono-magmatic settings, deposit types, metallogeny,

exploration and discovery. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, pp. 845–890.

30. SNL Metals and Mining. *Online Mineral Resources Database as of April*, 2014, available at: https://www.snl.com/marketing/microsite/MEG/mm_pagetwo.html (accessed 16 March 2022).

31. SNL Metals and Mining. *Online Database of Mineral Exploration Budget Trends for Copper, Nickel, Platinum, Palladium, Gold as of April*, 2014, available at: [\[sia.com/data/files/sectors/Metals-and-Mining-in-Russia.pdf\]\(https://www.snl.com/data/files/sectors/Metals-and-Mining-in-Russia.pdf\) \(accessed 16 March 2022\).](https://investinrus-</p></div><div data-bbox=)

32. Snow G. G. and Juuhas A. P. Trends and forces in mining and mineral exploration. *Society of Economic Geologists. Special Publication*, 2002, vol. 9, pp. 1–16.

33. Tilton J. E. Depletion and the long-run availability of mineral commodities. *Economic Geology. Special Publication*, 2006, no. 12, pp. 61–70.

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>

Турченко Федор Алексеевич – дипломант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). Ул. Союза Печатников, д. 16, Санкт-Петербург, Россия, 190121. <turdoto@gmail.com>

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. <turchsi@mail.ru>

Turchenko Feodor Alekseevich – Diplomat, National Research University «Higher School of Economics» (HSE University). Ul. 16 Soyuza Pechatnikov, St. Petersburg, Russia, 190121. <turdoto@gmail.com>