

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СРЕДНЕГО И СЕВЕРНОГО УРАЛА

Ю.А. Полтавец

Анализ литературы по проблеме рудоносности магматических комплексов показывает, что исследование закономерностей распределения благородных металлов (БМ) в различных типах магматических пород является важным элементом для решения различных геохимических и петрологических проблем; в частности, для суждения об особенностях состава верхней мантии и выплавляемых из нее базитовых расплавов, а также их потенциальной рудоносности [Аношин, 2000; Золоев и др., 2001; Puchtel and Humayun, 2000; Luguët et al., 2003; Маракушев, Шаповалов, 2004<sub>1</sub>; McDonough, Sun, 1995 и др.].

В связи с этим нами были рассмотрены геохимические данные по распределению БМ в рудных ассоциациях и вмещающих породах, полученные при изучении железорудных месторождений Северного и Среднего Урала [Полтавец и др., 2006, 2007<sub>1</sub>, 2007<sub>2</sub>], а также данные других исследователей [Аникина и др., 2005; Ефимов, 2002; Викентьев и др., 2005; Волченко др., 2001, 2007; Молошаг, Коробейников, 2000; Мурзин и др., 1988 и др.]. Для сравнения были привлечены также и литературные данные по другим регионам мира [Аношин, 2000; Luguët et al., 2003; Nielsen et al., 2005 и др.], позволяющие оценить характер распределения благородных металлов в породах и рудах Урала по сравнению с другими регионами, а также степень обоснованности полученных закономерностей и сделанных выводов. Результаты анализов рудных ассоциаций и вмещающих пород ряда месторождений Урала и некоторых других регионов на БМ отражены в табл. 1 и на рис. 1.

Анализ геохимических (см. табл. 1) и экспериментальных данных, касающихся поведения Au, Pd и Pt во флюидно-магматических и гидротермальных системах [Горбачев и др.,

2007; Горбачев, 2007; Маракушев и др., 2004<sub>2</sub>] показывает, что: 1) породы, рудные ассоциации и главные рудные минералы скарново-магнетитовых месторождений Среднего Урала (Тагило-Кушвинский рудный район) отличаются от таковых в скарново-магнетитовых месторождениях Северного Урала (Ауэрбахо-Турьинское рудное поле) более высоким содержанием Pd и Pt, а также отношением Pd к Pt, что достаточно отчетливо видно на диаграмме (см. рис. 1); 2) составы пород, руд и рудных минералов месторождений Среднего Урала (как скарновых, так и позднемагматических) на диаграмме Pd/Pt – (Pd+Pt) (см. рис. 1) образуют единое поле, непосредственно примыкающее к полю океанических базальтов и габбро-троктолит-лерцолитовому комплексу 3-го сейсмического слоя (САХ) [Аношин, 2000]; 3) для пород и руд месторождений Урала позднемагматического генезиса (Волковское рудное поле, Серебрянское рудопроявление) свойственна следующая геохимическая специфика в характере распределения БМ: Pd>Au>Pt. Аналогичная закономерность наблюдается и в других регионах, в частности, в габброидах Скергаардского массива [Nielsen et al., 2005], в габбро-троктолит-лерцолитовом комплексе 3-го сейсмического слоя САХ [Аношин, 2000]. Важно при этом подчеркнуть, что преобладание Pd над Pt отчетливо проявляется и в экспериментах, связанных с расслоением сульфидсодержащего расплава с образованием сульфидного и силикатного расплавов, для которых Pd/Pt отношение соответственно равны 62,7 и 3,5 [Маракушев и др., 2004<sub>2</sub>]. При пересчете концентраций Pd и Pt в экспериментах из атомных % в г/т величина Pd /Pt отношения в сульфидной фазе (расплаве) примерно на порядок превышает Pd/Pt в сосуществующем расплаве, то есть  $[Pd /Pt]^{sf} > [Pd /Pt]^{расплав} \approx 9,8$ . Практически

**Средние содержания (в г/т) благородных металлов  
в породах и рудных минералах месторождений Урала и других регионов**

Месторождение, рудопоявление, регион	Характеристика пробы	Pd	Au	Pt	Pd/Pt
Месторождения железных и медных руд скарновой формации Среднего и Северного* Урала					
Гороблагодатское	Магнетиты (5)	0,080	0,006	0,006	13,33
	Халькопирит+пирит (10)	0,240	1,070	0,028	8,57
	Пириты (5)	0,173	1,236	0,016	10,81
Лебяжинское	Магнетиты (12)	0,076	0,350	0,012	6,33
	Халькопирит+пирит (19)	0,654	1,650	0,030	21,80
	Пириты (11)	0,299	0,185	0,020	14,95
Высокогорское	Халькопирит+пирит (4)	0,500	0,050	0,035	14,28
Естюнинское	Магнетиты (9)	0,569	0,150	0,026	21,88
	Халькопирит+пирит (6)	1,730	0,250	0,253	6,83
Вадимо-Александровское*	Диориты (12)	0,023	0,020	0,041	0,56
	Халькопириты (6)	0,014	0,333	0,020	0,70
	Пириты (4)	0,016	0,043	0,027	0,59
Месторождения титаномагнетитовой формации Среднего и Северного* Урала					
Волковское	Габбро (11)	0,047	0,025	0,018	2,61
	Титаномагнетиты (11)	1,215	0,360	0,029	41,89
	Борнит+халькопирит (26)	7,937	1,420	0,327	24,27
	Пириты (11)	0,200	0,080	0,030	6,66
Клюевское	Габбро лабрадорское (42)	0,200	0,004	0,006	3,00
	Габбро оливин-магнетитовое (41)	0,120	0,044	0,006	19,00
	Клинопироксениты плагиоклазовые (310)	0,450	0,071	0,022	20,00
	Клинопироксениты магнетит- роговообманковые (98)	0,340	0,050	0,018	19,00
	Клинопироксениты оливиновые (202)	0,990	0,144	0,041	24,00
Серебрянское*	Габбро (5)	0,304	0,079	0,060	5,06
	Сульфиды (4)	10,83	2,175	1,850	5,85
Другие регионы					
Срединно- Атлантический хребет (САХ)	Толеитовые базальты	0,021	0,005	0,010	2,04
	Оливиновые базальты	0,053	0,005	0,003	16,44
	Габбро	0,026	0,005	0,004	5,84
	Троктолиты	0,032	0,020	0,013	2,46
	Ультрабазиты	0,021	0,009	0,008	2,71
	Лерцолиты	0,021	0,008	0,007	2,83
Атлантический океан, Kane Fracture Zone (KFZ)	Гарцбургиты (10)	0,003	0,002	0,006	0,53
	Лерцолиты (10)	0,002	0,001	0,006	0,39
Примитивная верхняя мантия		0,004	0,001	0,007	0,55

*Примечание.* При составлении таблицы использованы данные: Ю.А. Волченко и др. [2007] и А.А. Ефимова и др. [2002] по Серебрянскому массиву; И.А. Русина и др. [2004] – по Клюевскому рудопоявлению; Luguat A. et al [2003] – по (KFZ) и Mc Donough W.F., Sun S. [1995] – по составу примитивной верхней мантии. В скобках – число анализов.

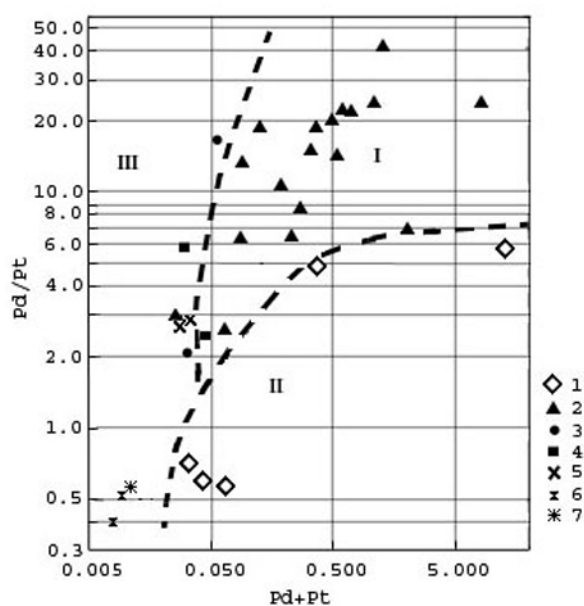


Рис. 1. Зависимость Pd/Pt соотношения от количества (Pd+Pt) в породах и рудах месторождений Среднего и Северного Урала.

I – область развития пород и руд месторождений Среднего Урала, II – то же Северного Урала, III – то же мантийных пород Срединно-Атлантического океана.

1-7 – месторождения и рудопроявления: 1 – месторождения Тагило-Кушвинского рудного района, Средний Урал (см. табл. 1), 2 – Ауэрбах-Турьинского рудного поля и Серебрянское рудопроявление), 3-5 – соответственно базальты, габброиды и ультраосновные породы САХ по [Аношин, 2000], 6 – гарцбургиты и лерцолиты по [Luguet et al., 2003], 7 – верхняя мантия по [McDonough, Sun S-s, 1995].

то же самое наблюдается на примере наиболее представительной выборки по Волковскому месторождению, где Pd/Pt отношение в борнит-халькопиритовой ассоциации превышает Pd/Pt отношение в безрудных габбро в 9,3 раза.

Таким образом, триада элементов, в которой доминирует Pd, проявлена на большинстве рассматриваемых месторождений, располагающихся на Среднем Урале. Это обусловлено не только проявлением у палладия халькофильных свойств в большей степени, чем у платины или золота, но и, по-видимому, в определенной степени связано со щелочностью исходных расплавов или растворов. О влиянии щелочности расплава, на наш взгляд, свидетельствует тот факт, что породы и сульфиды Вадимо-Александровского месторождения скарново-медных руд характеризуются несколько иной геохимической специализацией

(Pt>Pd). Как известно, это месторождение пространственно ассоциирует с габбро-диоритовой интрузией меньшей щелочности по сравнению со скарновыми месторождениями железа и меди Тагило-Кушвинского рудного района, которые связаны с диорит-сиенитовыми интрузиями.

При обращении к экспериментальным данным [Горбачев и др., 2007; Горбачев, 2007], нельзя не заметить, что в гидротермальной системе в широком интервале температур и давлений, а также концентраций кислотных компонентов (H<sub>2</sub>S, HCl) в рудообразующих растворах Au преобладает над Pd. В этой связи преобладание Au над Pd в сульфидах уральских скарновых месторождений железа и меди (Горблагодатское, Лебяжинское, Вадимо-Александровское) представляется вполне закономерным. И, наоборот, в условиях магматического процесса Pd характеризуется по сравнению с другими БМ наименьшим коэффициентом распределения между флюидом и базальтовым расплавом ( $K^{fl} = 0,04-0,06$  при T=1100 °C) [Горбачев и др., 2007]. Поэтому нет ничего неожиданного в том, что медно-сульфидные оруденения позднемагматического генезиса (Волковское, Серебрянское, Скергаардское) характеризуются преобладанием Pd над другими элементами (Au и Pt).

При минералого-геохимических исследованиях медносульфидных руд на месторождениях и рудопроявлениях, связанных с габбровыми массивами на Урале [Аникина и др., 2005; Волченко и др. 2001, 2007; Мурзин, Молошаг, 1988; Полтавец и др., 2006 и др.], обращает на себя внимание явная приуроченность БМ (Pd, Au и Pt) к сульфидам меди (борниту и халькопириту, реже к другим минералам) преимущественно в виде самостоятельных минеральных фаз, главным образом, теллуридов с примесями меди, висмута, мышьяка и др., тогда как сульфиды БМ пользуются заметно меньшим распространением. Ранее, в литературе уже обращалось на это внимание; при этом считается, что такая закономерность является характерной чертой многих месторождений платиновой группы. Такое кажущееся на первый взгляд несоответствие исследователи обычно склонны объяснять перераспределением БМ из сульфидной фазы под действием более поздних флюидов [Аношин, 2000]. Не отрицая процессов перераспределения БМ, мы, тем не менее, считаем, что основная причина широкого развития теллуридов БМ, а не их

сульфидов, заключается в различии химического сродства рассматриваемых элементов к сере и теллуру, на что ранее нами уже обращалось внимание [Полтавец и др., 2006]. На рис. 2 по данным табл. 2 показаны кривые равновесий теллуридов и сульфидов палладия и платины в зависимости от температуры.

Из рис. 2 следует, что во флюидно-магматическом расплаве (или растворе) в широком интервале температур Pd и Pt будут образовывать наиболее устойчивые соединения с теллуром, а не серой; причем при равной активности S и Te во флюидной фазе снижение температуры среды рудообразования в условиях относительно небольшого температурного градиента должно приводить к замене минеральных ассоциаций Pd и Pt в форме теллуридов на сульфидную. Обращает на себя внимание близкое расположение кривых равновесий с участием таких минералов как куперит (PtS), меринскит (PdTe<sub>2</sub>) и котульскит (PdTe), что может способствовать (при прочих равных условиях) широкому развитию ассоциации этих минералов в природных условиях. Как следует из диаграммы, образование высокоцита (PdS) в высокотемпературной области (>600 °C) за счет разложения дисульфида палладия (PdS<sub>2</sub>) должно происходить в условиях повышенного парциального давления S<sub>2</sub> (десятки и сотни бар), что маловероятно. По-видимому, в природных условиях образование высокоцита происходит при значительно меньшей температуре и соответствует низкотемпературной части диаграммы.

Таким образом, изложенный материал позволяет высказать следующее предположение относительно причины различной геохимической специализации в распределении Pd, Pt

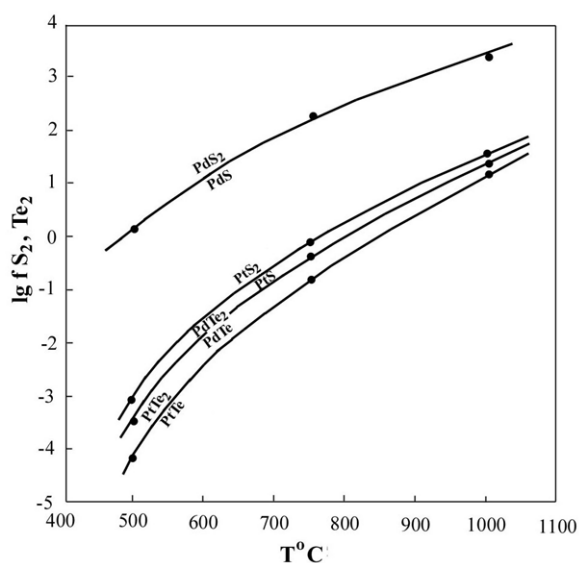


Рис. 2. Кривые равновесий между сульфидами и теллуридами палладия и платины в зависимости от температуры.

и Au на месторождениях Среднего и Северного Урала. Первопричиной этому является, на наш взгляд, геохимическая неоднородность (расслоенность) мантийных блоков в пределах Среднего и Северного Урала, в которых зарождаются родоначальные магмы, эволюционирующие впоследствии в отдельные рудно-магматические системы. В рудовмещающих породах и рудах позднемагматического генезиса (Волковское, Скергаардское) геохимическая специализация распределения БМ представлена в виде: Pd>Au>Pt. В этом отношении, как уже отмечалось выше, она качественно сходна с габбро-троктолит-лерцолитовым комплексом 3-го сейсмического слоя коры Срединно-Атлантического хребта, с габброидами Скергаардского массива [Nielsen et al., 2005], где содер-

Таблица 2

**Свободные энергии ( $\Delta G_p^T$ , ккал) реакций равновесий между сульфидами и теллуридами палладия и платины в зависимости от температуры**

Реакция	Температура, °C		
	500	750	1000
$PdS_2 \leftrightarrow PdS + 0,5 S_2 \uparrow$	-0,286	-5,293	-10,147
$PtS_2 \leftrightarrow PtS + 0,5 S_2 \uparrow$	5,419	0,277	-4,727
$PdTe_2 \leftrightarrow PdTe + 0,5 Te_2 \uparrow$	5,970	0,717	-4,350
$PtTe_2 \leftrightarrow PtTe + 0,5 Te_2 \uparrow$	8,385	3,266	-1,701

*Примечание.* Расчеты  $\Delta G_p^T$  выполнены с использованием коэффициентов уравнения температурной зависимости теплоемкости реагирующих фаз по уравнению  $\Delta G_p^T = \Delta G_p^0 - [\Delta S(T-298) + \Delta a \times A_z + \Delta b \times B_z + \Delta c \times C_z]$  и уточненных термодинамических констант [Каржавин, 2007].

жания этих металлов (г/т) в габбро из разных горизонтов колеблются в следующих пределах: Pd(0,008-0,115) > Au(0,006-0,029) > Pt(0,006-0,022), а также с океаническими оливиновыми базальтами [Аношин, 2000].

В скарново-магнетитовых месторождениях железа и меди в отношении закономерностей распределения БМ картина более сложная. Руды Высокогорского и Естюнинского месторождений в целом также характеризуются аналогичным характером распределения этих металлов (Pd>Au>Pt). Поэтому, в соответствии с известной петрологической моделью развития островодужных комплексов [Рингвуд, 1981] можно предположить, что интрузивные породы (габбро, диориты, сиениты) Высокогорского и Естюнинского месторождений и их вулканические комагматы известково-щелочного и субщелочного ряда, а также рудоносные породы (пироксениты, габброиды и связанные с ними руды) Волковского рудного поля, становление которых происходило в коре на гипо- и мезоабиссальном уровнях глубинности, являются продуктами сегрегации расплавов в промежуточных очагах в интервале глубин 60 и 20 км. Эти расплавы, по предположению А.Е. Рингвуда [1981] «должны быть насыщены или почти насыщены водой». Последние, в свою очередь, являются производными диапирового поднятия и частичного плавления водосодержащего пироксенита, происшедшего на глубинах более 60 км. На Гороблагодатском и Лебяжинском месторождениях, связанных, как уже отмечалось, с магматическими породами щелочного ряда, наблюдается несколько иной тип специализации, а именно: Au>Pd>Pt. Общее сходство скарново-магнетитовых месторождений Тагило-Кушвинского рудного узла заключается в преобладании палладия над платиной. И в этом отношении месторождения этого узла отличаются от скарново-медных руд Вадимо-Александровского месторождения на Северном Урале, в котором, наоборот, платина доминирует над палладием. Преобладанием платины над палладием характеризуются и другие породы этого рудного района, в частности, дуниты Устейского массива, где концентрации БМ составляют (в г/т): Pt(0,015) > Pd( 0,004) > Au(0,0). Можно также отметить, что аналогичной закономерностью характеризуются, например, магнезиальные базальты Большого трещинного Толбачинского извержения [Аношин, 2000]. Судя по литературе [McDonough, Sun-

1995; Luguet et al., 2003 и др.], специализация: Pt>Pd>Au свойственна обычно породам самых верхних горизонтов мантии (толеитовым базальтам, комплементарным гарцбургитам и оливиновым щелочным базальтам комплементарным лерцолитам), являющимся продуктами частичного плавления и дифференциации мантийного субстрата. Следует заметить также, что аналогичная закономерность свойственна и средним содержаниям этих металлов в сульфидной и силикатной фазах в хондритах типа L [Маракушев и др., 2004]. Этот тип геохимической специализации, следовательно, свойственен породам, образовавшимся в сильно восстановительных условиях.

Таким образом, в процессе становления рудоносных комплексов с сопутствующей благороднометальной минерализацией, сопровождающихся возрастанием окислительного режима их формирования, в общем прослеживается следующая тенденция в геохимической направленности распределений БМ: (Pt>Pd>Au)-(Pd>Au>Pt)-(Au>Pd>Pt).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-“Урал” (№ 07-05-96057).*

### Список литературы

- Аникина Е.В., Заккарини Ф., Кнауф В.В. и др.* Минералы палладия и золота в рудах Баронского рудопроявления (Волковский габбро-диоритовый массив) // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. № 4. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 5-25.
- Аношин Г.И.* Аналитическая геохимия благородных металлов и ртути // Автореф... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2000. 56 с.
- Викентьев И.В., Грабежьев А.И., Молошаг В.П. и др.* Платиноиды в рудах магнетит-медно-скарновых месторождений Урала // Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 328-331.
- Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Неустроева И.И. и др.* Основные минералого-геохимические черты нового баронского типа золото-палладиевых руд Урала // Ежегодник-2000. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. С. 135-140.
- Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Неустроева И.И. и др.* Новые золото-палладиевые проявления Палладиеносного пояса Урала // Ежегодник-2006. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 214-220.



- Горбачев Н.С., Дадзе Т.П., Каширцева Г.А.* Экспериментальное изучение поведения золота и палладия во флюидно-магматических и гидротермальных системах // V Всероссийское совещание Минералогия Урала-2007. Екатеринбург, 2007. С. 305-308.
- Горбачев П.Н.* Растворимость платины в силикатных расплавах // V Всероссийское совещание Минералогия Урала-2007. Екатеринбург, 2007. С. 308-311.
- Ефимов А.А., Ефимова Л.П., Волченко Ю.А.* О платиноносности медносульфидных руд Серебрянского Камня (Платиноносный пояс Урала) // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С. 219-222.
- Золоев К.К., Волченко Ю.А., Коротев В.А. и др.* Платинометальное оруденение в геологических комплексах Урала. Екатеринбург: ОАО УГСЭ, 2001. 199 с.
- Каржавин В.К.* Сульфиды, селениды, теллуриды платины и палладия. Оценка термодинамических свойств // Геохимия. 2007. № 9. С. 1014-1021.
- Маракушев А.А., Шаповалов Ю.Б.* Экспериментальные и теоретические исследования интрузивов и их рудоносности // Экспериментальная минералогия. Некоторые итоги на рубеже столетий. М.: Наука. Т. 2. 2004. С. 217-233.
- Маракушев А.А., Шаповалов Ю.Б., Столярова Т.А.* Металлургический метод извлечения платиновых металлов // Экспериментальная минералогия. Некоторые итоги на рубеже столетий. М.: Наука. Т. 2. 2004. С. 273-279.
- Молошаг В.П., Коробейников А.Ф.* Новые данные о платиноидной минерализации медно-железо-ванадиевых руд // Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 90-101.
- Мурзин В.В., Молошаг В.П., Волченко Ю.А.* Парагенезис минералов благородных металлов в медно-железо-ванадиевых рудах волковского типа на Урале // ДАН СССР. 1988. Т. 300. № 5. С. 1200-1202.
- Полтавец Ю.А., Полтавец З.И.* Геохимические особенности сульфидов из руд различных генетических типов // Ежегодник-2006. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 260-263.
- Полтавец Ю.А., Полтавец З.И., Нечкин Г.С.* Закономерности распределения и условия концентрирования рудообразующих (Fe,Cu) и сопутствующих (благородных металлов и др.) элементов на магматическом и постмагматическом этапах развития железозносных базальтоидных рудно-магматических систем Среднего Урала // Геология Урала и сопредельных территорий. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 406-426.
- Полтавец Ю.А., Сазонов В.Н., Полтавец З.И. и др.* Закономерности распределения благородных металлов в рудных парагенезисах Волковского габбрового массива (Средний Урал) // Геохимия. 2006. № 2. С. 167-190.
- Рингвуд А.Е.* Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 584 с.
- Русин И.А., Аникина Е.В., Берсенева С.Я.* Распределение благородных металлов в мафит-ультрамафитовом разрезе горы Ключевская, Волковский габбро-диоритовый массив // Ежегодник-2003. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. С. 346-353.
- McDonough W.F., Sun S-s.* The composition of the Earth // Chem.Geology. 1995. 120. P. 223-253.
- Luguet A., Lorand J.P., Seyler M.* Sulfide petrology and highly siderophile element geochemistry of abyssal peridotites: A coupled study of samples from the Kane Fracture Zone (45° W 2320N, MARK Area, Atlantic Ocean) // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2003. V. 67. № 8. P. 1553-1570.
- Nielsen T.F.D., Andersen J.C., Brooks C.K.* The platinum reef of the Skaergaard intrusion // Mineralogical Association of Canada Short Course 35. Oulu, Finland, 2005. P. 431-455.
- Puchtel I.S., Humayun M.* Platinum group elements in Kostomuksha komatiites and basalts: Implications for oceanic crust recycling and core-mantle interaction // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2000. V. 64. № 24. P. 4227- 4242.