



УДК 553.491.4(571.51)

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.3>

## **Петрогеохимические особенности платиноносных метапикритов Кулибинского потенциального рудного узла (Восточный Саян)**

Н. А. Бабинцев

*Красноярский научно-исследовательский институт геологии  
и минерального сырья, г. Красноярск*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск*

А. И. Чернышов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск*

**Аннотация.** Объектом исследования являются мафит-ультрамафитовые комплексы Кулибинского потенциального рудного узла, включая интрузивные образования кингашского комплекса и метаэффузивы кулижинской и кузынской толщ; изученные объекты располагаются на северо-западном окончании Канского зеленокаменного пояса в Восточном Саяне. Актуальность исследования обусловлена появлением новых данных о геологических образованиях Канского зеленокаменного пояса, являющихся объектом широких дискуссий. По результатам исследования установлено, что перспективы территории связаны с малосульфидным платинометалльным типом руд, которые были обнаружены в мафит-ультрамафитовых телах кингашского дунит-верлит-пикритового магматического комплекса. Характер геохимической зональности и положение платинометалльного оруденения – типичное для известных магматических платинометалльных месторождений в расслоенных мафит-ультрамафитовых комплексах. Дана характеристика рудовмещающих толщ, описаны особенности их геохимической зональности, химического и минерального состава, закономерности распределения полезных компонентов. Установлено, что наиболее перспективными на элементы платиновой группы являются пластовые тела метапикритов, дифференцированные от пикробазальтов в кровле до высокомагнезиальных оливиновых пикритов в подошве. Выявлены геолого-геохимические критерии выделения продуктивных горизонтов. Дана характеристика попутного оруденения. По комплексу признаков в качестве аналога предложены платинометалльные месторождения комплекса Порtimo (Финляндия) – Контиярви, Ахмаваара.

**Ключевые слова:** ультрамафиты, пикриты, платина, палладий, малосульфидные платинометалльные месторождения, зеленокаменный пояс.

**Для цитирования:** Бабинцев Н. А., Чернышов А. И. Петрогеохимические особенности платиноносных метапикритов Кулибинского потенциального рудного узла (Восточный Саян) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 26. С. 3–17. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.3>

## **Введение**

В последние годы в результате прогнозных, поисковых и тематических работ в пределах Кулибинского потенциального рудного узла (Восточно-Саянской платино-никеленозной провинции) выявлены геологические перспективы обнаружения промышленных скоплений руд платиноидов. Оруденение относится к малосульфидному платинометалльному типу, который на данной территории изучен слабо, авторами проведены исследования рудоносности образований Кулибинского потенциального рудного узла (ПРУ) и геохимии его мафит-ультрамафитовых магматических комплексов. Петрогеохимические особенности и их взаимосвязь с оруденением описаны в данной работе.

## **Региональная позиция Кулибинского ПРУ**

Канская глыба, ограниченная зонами разломов, занимает пограничное положение между юго-западной окраиной Сибирского кратона и структурами складчатого обрамления. Такое положение обуславливает сложное блоково-чешуйчато-надвиговое строение и интенсивную тектонизированность амфиболито-гнейсовых толщ, для которых характерны минеральные ассоциации зеленосланцевой, эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций [Состав, строение и условия ... , 2001]. В Канской глыбе выделены Идарский и Канский зеленокаменные пояса (ЗКП), в пределах которых значительным распространением пользуются мелкие тела ультрамафитов [Chernyshov, Nozhkin, Mishenina, 2010] (рис. 1). При этом наличие зеленокаменных поясов указывает на возможность обнаружения в них магматических сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений [Barrie, Naldrett, 1988; Condie, 1981; Gresham, Loftus-Hills, 1981; Naldrett, 1989; Naldrett, Turner, 1977]. Наиболее изученным является Идарский ЗКП, в пределах которого выделяется Кингашский рудный район (Кингашский РР), на его территории выявлено Кингашское медно-никелевое месторождение с платиноидами и ряд более мелких месторождений и рудопроявлений. Ультрамафиты Идарского и Канского ЗКП объединяются в два комплекса: кингашский магматический дунит-верлит-пикритовый и идарский реститовый дунит-гарцбургитовый [Chernyshov, Nozhkin, Mishenina, 2010], с первым из них связаны медно-никелевые оруденения. Исследуемый нами Кулибинский потенциальный рудный узел является Кирельским фрагментом Канского ЗКП [Состав, строение и условия ... , 2001].

## **Геологическое строение Кулибинского ПРУ и смежных территорий**

В центральной части Канского ЗКП картируется преимущественно вулканогенный разрез, представленный в нижней части амфиболитами с горизонтами мраморов и биотитовых ортогнейсов (мощность 300–1100 м), а в верхней сложен преимущественно ортогнейсами с редкими телами амфиболитов и горизонтами парагнейсов (мощность ~700 м). На северо-западе пояса увеличивается доля гнейсов, разрез наращивается толщей

амфибол-биотитовых парагнейсов, кварцево-сланцевых сланцев с горизонтами кварцитов. Для юга Канского ЗКП характерно переслаивание биотитовых, биотит-амфиболовых, реже амфиболовых ортогнейсов с подчиненными амфиболитами и редкими прослоями мраморов (мощность ~1400 м). Разрез наращивается толщей биотитовых, двуслюдяных парагнейсов с очковой текстурой (мощность ~700 м). Указанные толщи вмещают субвулканические рудоносные массивы ультрамафитового состава, выделяемые в кингашский магматический комплекс. Встречаются многочисленные мелкие тела апоперидотит-дунитового состава, которые, очевидно, являются протрузиями либо будинами и относятся к идарскому реститовому комплексу. Характерна также насыщенность толщ субсогласными и согласными с гнейсовидностью, реже секущими жилами плагиогранитов и их пегматоидными разностями [Состав, строение и условия ... , 2001]. Вулканогенно-осадочные толщи Канского ЗКП датируются как раннепротерозойские возрастом ~2–2,4 млрд лет [Состав, строение и условия ... , 2001], возраст ультрамафитов, их интродуцирующих, оценивается по аналогии с Кингашским массивом одноименного комплекса и принимается равным ~1,4 млрд лет [Возраст и природа вещества ... , 2009]. По данным предшественников [Состав, строение и условия ... , 2001], формирование вулканогенно-осадочных толщ Кулибинского ПРУ происходило в обстановке энсиалической палеоостровной дуги, развитие которой осложнялось зоной задугового спрединга.

Территория Кулибинского ПРУ сложена метаморфитами кулижинской толщи – амфиболитами, гнейсами, биотит-амфиболовыми сланцами, которые вмещают небольшие тела базитов и гипербазитов кингашского и идарского комплексов, а также малые тела гранитоидов кирельского (саянского) комплекса.

Породы кингашского комплекса характеризуются существенной неоднородностью состава, что обусловлено значительной степенью дифференцированности исходных высокомагнезиальных пикритовых расплавов и глубиной их кристаллизации [Чернышов, Бабинцев, Ворошилов, 2017]. Ранние дифференциаты комплекса образуют линзовидные, пластообразные и чашеобразные тела (фрагменты тел?) мощностью до первых сотен метров, пространственно сближенные и приуроченные к крупным разломам. Они сложены дунитами и вторичными по ним породами. Оливин в таких дунитах подвержен интенсивному замещению вторичными минералами и отличается пониженной железистостью [Чернышов, Бабинцев, Ворошилов, 2017]. В породах отмечается рассеянная первично-магматическая пирротин-пентландитовая вкрапленность, рудные минералы образуют сфероидальные срастания и замещаются вторичным магнетитом. Более поздние дифференциаты кингашского комплекса образуют дайки различной мощности (до первых десятков метров) и пластовые тела мощностью до 80 м. Они сложены метапикритами, пироксенитами, брекчиями по ультрамафитам, а также ассоциирующими габбро-долеритами. В этих породах зачастую отмечается эпимагматическая сульфидная минерализация, в отдельных случаях до 50 % от объема породы.

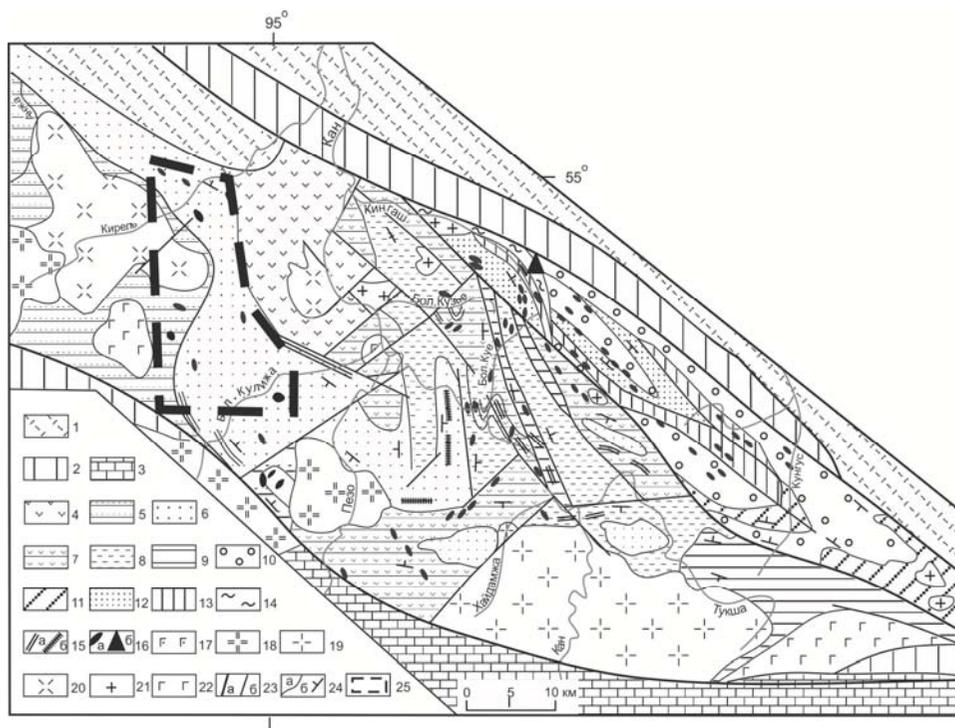


Рис. 1. Геологическая карта Канской гранит-зеленокаменной провинции [Состав, строение и условия ... , 2001]

1 – осадочно-вулканогенные образования девона (Рыбинская впадина); 2 – вулканогенно-осадочные отложения позднего рифея-кембрия; 3 – метатерригенно-карбонатные комплексы протерозоя; 4–5 – позднерифейские метаморфические гнейсово-амфиболитовые комплексы: 4 – Шумихинского террейна, 5 – Кирельского ареала; 6–15 – метаморфические толщи зеленокаменных поясов раннего протерозоя: 6 – биотитовых и гранат-биотитовых парагнейсов, 7 – гнейсово-амфиболитовая (дацит-базальтовая), 8 – биотитовых и амфиболовых ортогнейсов (андезит-дацит-риодацитовая), 9 – амфиболитовая (пикробазальт-базальтовая), 10 – гранатсодержащих амфиболовых и биотитовых парагнейсов (граувакковая), 11 – полевошпатовых амфиболитов (лейкобазальт-андезитбазальтовая), 12 – гранатсодержащих биотитовых парагнейсов (терригенная) и амфиболитов, 13 – амфиболитовая с горизонтами тремолит-серпентиновых сланцев (комагитит-базальтовая), 14 – мигматит-гнейсовая; 15 – маркирующие горизонты: а) мраморов, б) кварцитов; 16 – тела ультрамафитов (вне масштаба) (а); треугольником обозначено положение Кингашского рудоносного массива (б); 17–22 – интрузивные комплексы: 17 – палеозойский габброидный, 18 – ордовикский лейкогранит-гранитовый, 19 – вендский трондьемитовый (Верхнеканский массив), 20 – верхнерифейский тоналит-трондьемитовый (Шумихинский и Кирельский массивы), 21 – позднерифейский плагиогранит-гранитовый (Кузынский массив), 22 – раннепротерозойский габбровый; 23 – тектонические границы: а) региональные разломы, б) прочие; 24 – а) геологические границы, б) элементы залегания толщ, 25 – Кулибинский ПРУ

Породы идарского комплекса образуют небольшие линзовидные тела, сложенные дунитами и гарцбургитами. Особенностью пород данного комплекса является наличие бластоструктур, схожих со структурами метаморфических пород, низкая, в сравнении с кингашскими ультрамафитами, железистость и характерная хромшпинелевая рудная минерализация. По комплексу признаков данные породы относятся к реститовым образованиям,

неперспективным на обнаружение сульфидных медно-никелевых и мало-сульфидных платинометалльных руд. Между тем мелкие тела идарского комплекса повсеместны и нередко пространственно совмещены с рудоносными телами кингашского комплекса. Детально различия между породами кингашского и идарского комплексов Кингашского РР и Кулибинского ПРУ, как и критерии их разделения, описаны в [Чернышов, Бабинцев, Ворошилов, 2017]. Ключевыми параметрами при разделении ультрамафитов данных комплексов являются микроструктурные особенности (в породах кингашского комплекса наблюдаются реликты кумулятивных структур), составы минералов (оливины кингашского комплекса существенно более железистые), характер распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) (породы кингашского комплекса характеризуются меньшими  $La_n/Sm_n$  и более пологим наклоном графиков распределения РЗЭ, нормированных к хондриту C1), концентрации редких элементов (породы кингашского комплекса характеризуются повышенными концентрациями Th, Zr, Hf, Y, Ta, Sc, Ga, Sr), в отдельных случаях – петрохимические особенности (породы кингашского комплекса могут характеризоваться повышенными отношениями  $MgO/FeO$ ,  $CaO/FeO$ , а также повышенными содержаниями  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ ) [Чернышов, Бабинцев, Ворошилов, 2017; Chernyshov, Nozhkin, Mishenina, 2010].

Повсеместно в пределах Кулибинского ПРУ выделяются малые тела гранитоидов кирельского (саянского) комплекса. Это дайки и штоки до первых сотен метров мощностью, сложенные микрогранитами и плагиогранитами. Следует отметить, что мелкие дайки и жилы плагиогранитов пронизывают гипербазитовые массивы повсеместно, и с ними зачастую связано перераспределение рудных компонентов.

Многочисленные разломы северо-восточного и северо-западного простирания обуславливают блоковое строение пород участка – они разбиты на блоки размером до  $1 \times 1,5$  км, смещённые относительно друг друга как по латерали, так и по вертикали. Определяющим тектоническое строение участка является взброс дугообразной формы, протягивающийся с юго-востока на северо-запад через весь участок. Метаморфические образования участка слагают моноклираль, падающую на северо-восток под углами  $40-60^\circ$ ; на отдельных участках моноклираль осложнена не только разрывными нарушениями, но и наложенными структурами более низкого порядка.

В породах кингашского комплекса Кулибинского ПРУ выделено пять основных рудных минеральных ассоциаций, характерных для различных типов пород:

1. Убого-вкрапленная первично-магматическая пентландит-пирротин-магнетитовая минерализация, характерная для ранних дифференциатов и развившихся по ним серпентинитов. В среднем такие породы несут сульфидную минерализацию на уровне  $0,5-2\%$ , оксидную –  $3-5\%$ . Характерны повышенные содержания Ni ( $0,2-0,5\%$ ) и Co (до  $0,05\%$ ), которые входят в виде примеси в состав породообразующих минералов, концентрации меди и элементов платиновой группы (ЭПГ) незначительны и зачастую ниже порога чувствительности применённых аналитических методов.

2. Убого-вкрапленная магматическая с наложенной эпимагматической пирит-халькопирит-ильменит-магнетитовая минерализация, характерная для пикритов. Суммарное количество сульфидов – 2–5 %, оксидов ~2 %. В отдельных горизонтах характеризуется повышенными содержаниями Pd (до 1 г/т) при низких Ni (0,01–0,05 %) и Cu (менее 0,01 %).

3. Вкрапленная и прожилково-вкрапленная эпимагматическая халькопирит-пирит-пирротиновая с графитом и рутилом минерализация, характерная для сульфидоносных метагаббро-долеритов и связанных с ними метасоматитов. Сульфидная вкрапленность колеблется на уровне 5–25 %, оксидная – 1–3 %. Отмечается сильная графитизация с формированием метасоматитов, вмещающих до 15–18 % графита. Характерны повышенные концентрации ЭПГ и меди.

4. Вкрапленная, прожилково- и гнездово-вкрапленная эпимагматическая халькопирит-пирит-пирротиновая минерализация, характерная для клинопироксенитов и брекчий по ним. Количество сульфидов колеблется от 5 до 25 %. Зачастую не несут значимых концентраций полезных компонентов, в отдельных случаях – повышенные содержания Pd (до 0,4 г/т).

5. Прожилково- и ориентированно-вкрапленная эпимагматическая пирит-халькопирит-пирротин-ильменит-магнетитовая минерализация, характерная для сосуществующих даек плагиогранитов и сопутствующих им изменённым вмещающим породам. Суммарный объем рудных минералов в породах, несущих данную ассоциацию, достигает 50 %. Характерны повышенные концентрации Pd (до 0,6 г/т) и Cu (до 0,24 %).

### **Петрогеохимические особенности рудоносных толщ**

*Количественные методы аналитических исследований.* В ходе проведения исследования в отобранных образцах определялись концентрации ЭПГ, Cu, Ni, Co и ведущих петрогенных окислов. Платиноиды определялись методами MS-ISP в лаборатории ГПКК «КНИИГиМС» (Pt, Pd, Ir, Rh, Ru) и атомно-эмиссионным скантillationным спектральным методом в лаборатории Института геохимии СО РАН (Pt, Pd). Концентрации Cu, Ni, Co определялись в лаборатории ГПКК «КНИИГиМС» атомно-абсорбционным методом. Силикатные анализы проводились в лабораториях Института геохимии СО РАН и ОАО «Минусинская ГРЭ». В ходе исследования использованы данные 37 авторских силикатных анализов и 56 заимствовано из результатов работ ГПКК «КНИИГиМС». При анализе геохимических особенностей поведения ЭПГ использованы результаты 112 авторских анализов и 957 заимствованных из материалов работ ГПКК «КНИИГиМС». Также из результатов работ ГПКК «КНИИГиМС» заимствованы данные 3081 атомно-абсорбционного анализа на Cu, Ni, Co и 3081 атомно-эмиссионного на 26 элементов.

В рудоносных metabazalt-metapikritovykh толщах вниз по разрезу возрастает магниальность (от 9,7 до 40,3 % MgO), что подчеркивается и изменением минерального состава от сосюрит-хлорит-актинолитового до серпентин-талк-тремолитового. К подошве рудоносных пикритовых пачек отмечается накопление Cr и Ti, при равномерном распределении в разрезе

Ni и некотором повышении концентраций Cu в приподошвенных частях. Характер изменения химического и минерального состава пород в разрезе палладиеносной метапикритовой толщи обусловлен процессами фракционирования и гравитационной отсадки в ходе дифференциации исходного высокомагнезиального расплава. Ультрамафитам Кулибинского ПРУ свойственно увеличение концентраций Cu и Pd с уменьшением магнезиальности, что возможно интерпретировать как следствие фракционирования, сопровождавшегося сегрегацией сульфидов [Andersen, Power, Momme, 2002].

Характерной особенностью Кулибинского ПРУ является существенное повышение концентраций ЭПГ в приконтактных частях даек плагиогранитов: от 0,2–0,3 во вмещающих породах до 0,8 г/т в зоне экзоконтакта даек. Большое количество плагиогранитных даек в разрезе является одним из критериев наличия тел с высокими концентрациями ЭПГ.

Тренд поведения ЭПГ пород Кулибинского ПРУ (рис. 2) существенно отличается от трендов классических расслоенных массивов Садбери и Бушвельда [Barnes, Naldrett, Gorton, 1985]. Для пород Кулибинского ПРУ и Кингашского РР общим является преобладание Pd над Pt при  $Pd > Pt + Ir$ , увеличение отношения Pd/Pt в ходе дифференциации исходного расплава, а также повышенные отношения Ni/Cu и Cr/Ti в платиноносных породах [Радомская, 2012; Геохимия и минералогия элементов ... , 2017]. В Кулибинском ПРУ отмечаются существенно меньшие концентрации Pt и Ni и большие – Rh. Отличия геохимических особенностей поведения ЭПГ в платиноносных породах Кулибинского ПРУ и Кингашского РР обусловлены формированием их в пределах Кулибинского ПРУ на поздних этапах эволюции из остаточного расплава, а в Кингашском РР – в два этапа с формированием богатых ЭПГ пород как на раннемагматической, так и на позднемагматической стадии [Геохимия и минералогия элементов ... , 2017]. Сходным с породами изучаемой территории характером распределения ЭПГ обладает ряд платинометалльных месторождений Кольского полуострова и Финляндии [Гавриленко, 2003; Pijna, Maier, Karinen, 2015]. Низкие концентрации Pt в породах Кулибинского ПРУ объясняются её выносом в ходе регионального метаморфизма; о значительном влиянии метаморфических процессов указывалось выше.

Палладиеносные породы Кингашского РР характеризуются выдержанным химическим составом и отсутствием значимых зависимостей концентраций ЭПГ от магнезиальности и титанистости пород (рис. 3); платиноносными в Кингашском месторождении являются дуниты, перидотиты и серпентиниты по ним, тогда как для низкомагнезиальных пироксенитов и ассоциирующих габброидов характерны концентрации ЭПГ на уровне первых десятков миллиграмм на тонну. В породах Кулибинского ПРУ наблюдается закономерное изменение концентраций Pd с изменением химического состава. В целом для пород Кулибинского ПРУ характерно увеличение концентраций палладия с уменьшением магнезиальности и увеличением содержания TiO<sub>2</sub>. Однако в пределах палладиеносных пикритовых толщ наблюдается обратная закономерность: к подошве последних магнезиальность растет вместе с увеличением концентраций палладия, наиболее высоких

значений достигающих в приподошвенных частях пикритовых толщ. Сами пикриты при этом являются поздними дифференциатами кингашского комплекса с пониженной магнезиальностью. Подобный характер распределения ЭПГ отмечается в породах маргинальной серии месторождений Контиярви и Ахмаваара (Финляндия) [Pijina, Maier, Karinen, 2015].

По соотношению Ni/Pd в Кулибинском ПРУ выделяются две породные ассоциации: а) ранние дифференциаты (дуниты, перидотиты), для которых характерны соотношения, близкие с рудоносными породами Кингашского рудного района; б) поздние дифференциаты (пикриты, пироксениты) и ассоциирующие с ними метабазиты, в которых концентрации Ni существенно меньше и, как правило, не превышают 0,1 %, а концентрации Pd в 5–10 раз выше, чем в ранних дифференциатах. Генеральный тренд увеличения концентраций ЭПГ с увеличением концентраций Ni сохраняется для обеих ассоциаций. Содержания Cu в породах Кулибинского ПРУ прямо коррелируют с концентрациями Pd. Положение фигуративных точек на бинарной диаграмме (рис. 3) отражает этот тренд. Ранние дифференциаты с наименьшими содержаниями Cu и Pd занимают положение в основании тренда, палладиеносные пикриты несут концентрации меди на порядок выше и располагаются в его окончании. На бинарной диаграмме Cu/Pd распределение полей фигуративных точек пород Кулибинского ПРУ и Кингашского рудного района являются близкими, однако поле Кулибинского ПРУ отличается существенно меньшими содержаниями Cu.

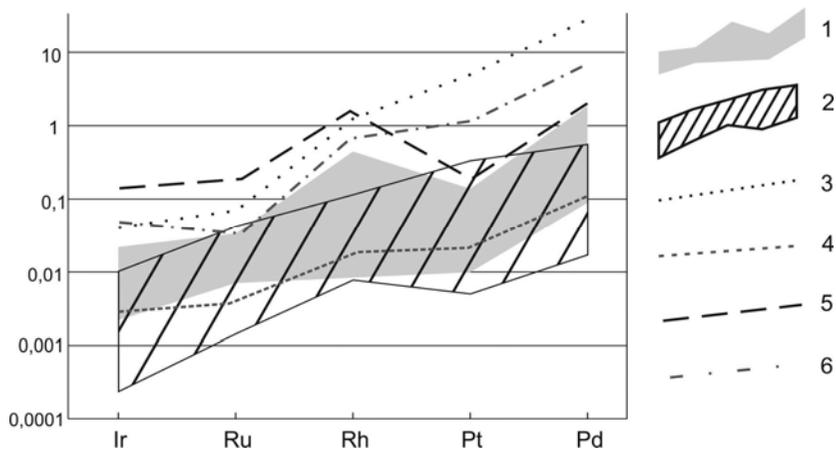


Рис. 2. Содержание благородных металлов в породах, нормированных к хондриту C1 [Naldrett, McDonough, Sun, 1995]

1 – Кулибинский ПРУ, породы кингашского комплекса (оригинальные данные), 2 – Кингашский РР, породы кингашского комплекса [Глазунов, Богнибов, Еханин, 2003; Радомская, 2003], 3 – Стиллуотер, Джей-Эм Риф (Stillwater JM Reef) [Andersen, Power, Momme, 2002], 4 – Мончеплутон, г. Ниггитс [Гавриленко, 2003], 5 – массивные сульфидные руды пояса Торнио-Наранкаваара (месторождения Суханко, Вааралампи, Нииттилампи, Айли-Портимоарви) [Pijina, Maier, Karinen, 2015], 6 – вкрапленные сульфидные платинометалльные руды пояса Торнио-Наранкаваара (месторождения Контиярви, Ахмаваара, Сиика-Кама, Райтикангас) [Pijina, Maier, Karinen, 2015].

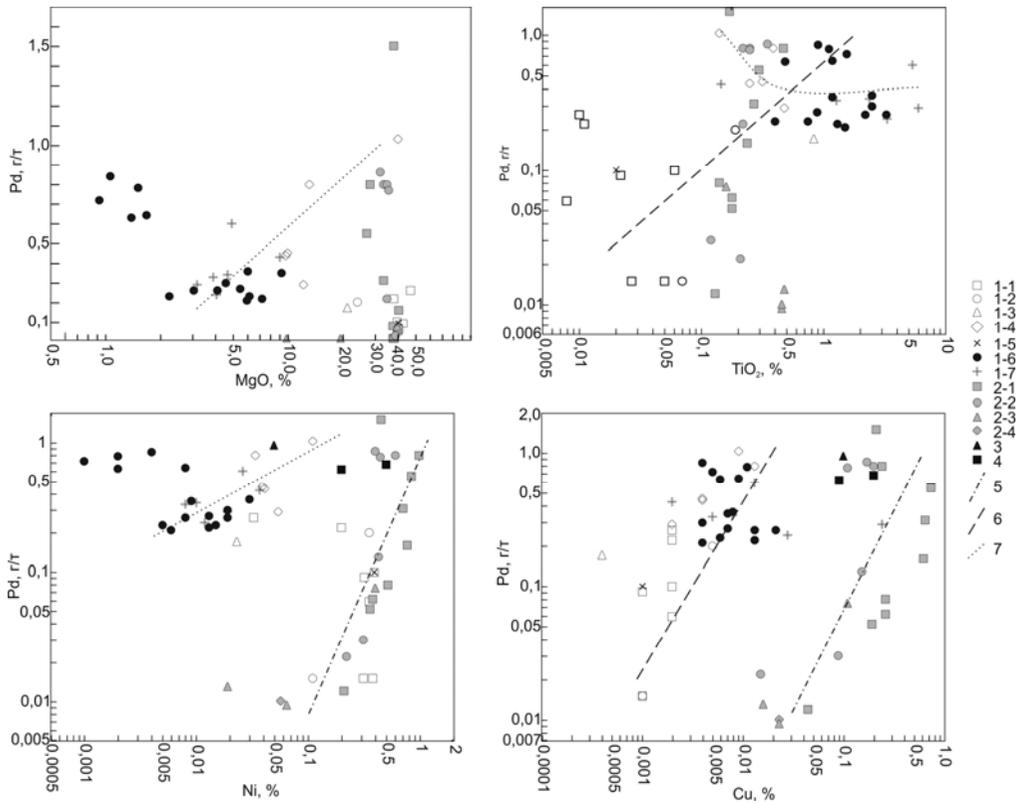


Рис. 3. Бинарные диаграммы составов пород кингашского комплекса Канского ЗКП

1 – Кулибинский ПРУ (материалы поисковых работ и неопубликованные данные авторов): 1–1 – дунит, 1–2 – серпентинит, 1–3 – клинопироксенит, 1–4 – пикрит, 1–5 – гарцбургит, 1–6 – мафиты, 1–7 – метасоматиты; 2 – Кингашский РР, породы кингашского комплекса [Глазунов, Богнибов, Еханин, 2003]: 2–1 – верлит, 2–2 – серпентинит, 2–3 – пироксенит, 2–4 – габбро; 3 – месторождение Котиярви, Финляндия [Pijina, Maier, Karinen, 2015]; 4 – месторождение Сопча, Мончегорский рудный район [Расслоенные интрузии Мончегорского ... , 2004]; 5 – тренды изменения состава пород кингашского комплекса в Кингашском РР; 6 – генеральные тренды изменения состава пород кингашского комплекса в Кулибинском ПРУ; 7 – тренды изменения состава поздних дифференциатов кингашского комплекса в Кулибинском ПРУ

По комплексу признаков (табл.) рудопроявления Кулибинского ПРУ обнаруживают сходство с месторождением Котиярви (расслоенные интрузии комплекса Портимо, Финляндия) [Pijina, Maier, Karinen, 2015; Naldrett, 1989]. Для месторождений, приуроченных к комплексу Портимо, характерно наличие так называемых платиноносных «рифов» с содержаниями ЭПГ до десятков грамм на тонну, что позволяет прогнозировать обнаружение крупных промышленно значимых платинометалльных объектов в пределах Кулибинского ПРУ. Запасы Pd месторождения Котиярви (по масштабам близкого к рудопроявлениям Кулибинского ПРУ) по результатам оценки на 2007 г. составили 71,48 т [Pijina, Maier, Karinen, 2015].

Таблица

Сравнительная характеристика рудопоявлений Кулибинского ПРУ и платинометалльных месторождений комплекса Портимо (Финляндия)

Критерий	Кулибинский ПРУ	Месторождение Контярви [Шјina, Maier, Karinen, 2015]	Месторождение Ахмаваара [Шјina, Maier, Karinen, 2015]
Рама рудоносного магматического тела	Раннепротерозойские апобазитовые амфиболиты и зелёные сланцы, плагиогнейсы	Архейские гранитогнейсы и кварциты, раннепротерозойские metabазальты	
Петрографический состав рудоносных магматических тел	Дуниты, перидотиты, пикриты, пироксениты, габброиды	Перидотиты, пироксениты, габброиды	
Форма рудоносных магматических тел	Силлы, лопполиты, дайки		
Основной тип рудной минерализации	Вкрапленный малосульфидный палладиевый. Среди сульфидов преобладают пирротин, халькопирит и пирит	Вкрапленный малосульфидный платино-палладиевый (с резким преобладанием Pd). Среди сульфидов преобладают пирротин, халькопирит и пентландит	
Морфология рудных тел	Залежи вкрапленных сульфидно-платинометалльных руд линзовидные и сложных форм. Рудные тела выделяются только по результатам опробования		
Положение оруденения в разрезе магматических тел	В зоне перехода от ультрамафитовой к мафитовой серии: нижние части ультрамафитовой серии и мафиты вблизи контакта с ними. В Кулибинском ПРУ – в метапикритах и меланократовых базитах, в месторождениях комплекса Портимо – в перидотитах, пироксенитах и меланогаббро вблизи контакта с ними. Вниз по разрезу ультрамафитовой части – увеличение концентраций ЭПГ, в мафитах по мере удаления от границы ультрамафитовой серии – постепенное снижение концентраций		
Концентрации основных рудных компонентов в рудоносных зонах	Cu ~ 0,01 % Ni ~ 0,1 % Pt < 0,02 г/т Pd – 0,4–1 г/т	Cu – 0,095 % Ni – 0,04 % Pt – 0,25 г/т Pd – 0,9 г/т	Cu – 0,18 % Ni – 0,07 % Pt – 0,18 г/т Pd – 0,85 г/т
Соотношение Pd/Pt	5–20	1,4–4,0	6,2–10,3
Попутное оруденение в магматических телах и вмещающей толще	«Оффсетные руды»: мелкие дайки базитов и гранитоидов, с которыми связана Cu-Pd-сульфидная минерализация, в том числе на удалении от рудоносных магматических тел во вмещающих их метаморфитах		

### Обсуждение результатов исследования

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие обобщения.

1. Исследуемая территория является Кирельским фрагментом Канского ЗКП, в пределах которого широко распространены мафит-ультрамафитовые

тела, с которыми могут быть связаны медно-никелевые и платинометалльные месторождения. Выделено два магматических комплекса: идарский реститовый дунит-гарцбургитовый и кингашский магматический дунит-верлит-пикритовый. К последнему приурочены известные сульфидные платино-медно-никелевые месторождения и рудопроявления.

2. Особенности геохимической зональности, последовательное изменение минерального состава и характера рудной минерализации в отдельных телах обнаруживают сходство изучаемых тел ультрамафитов с типичными расслоенными интрузиями мафит-ультрамафитового состава и свидетельствуют об их формировании в ходе дифференциации исходного высокомагнезиального пикритового расплава в неоднократно возникающих промежуточных магматических камерах. Дифференциация, главным образом, осуществлялась гравитационной отсадкой [Коматииты и высокомагнезиальные вулканы ... , 1988] с последующим внедрением порций расплава во вмещающие вулканогенно-осадочные толщи, без формирования крупных расслоенных массивов. Для Кулибинского ПРУ характерна платинометалльная специализация пород кингашского комплекса, в отличие от Кингашского РР, где руды комплексные Cu-Ni-платиноидные.

3. Наиболее перспективными на обнаружение промышленных скоплений ЭПГ в пределах потенциального рудного узла являются метапикритовые тела кингашского комплекса. В рудоносных частях таких тел вниз по разрезу возрастает магнезиальность, что подчёркивается и изменением минерального состава от сосюрит-хлорит-актинолитового до серпентинтальк-тремолитового. В кровельной части тел эти породы по химическому и минеральному составу близки к меланократовым мафитам (пикробазальтам), в приподошвенной – высокомагнезиальным ультрамафитам (оливиновым пикритам). Расположение малосульфидной платинометалльной минерализации в зоне перехода от мафитов к ультрамафитам обнаруживает сходство изучаемого объекта с классическими расслоенными массивами, вмещающими крупнейшие платинометалльные месторождения.

4. В целом для пород Кулибинского ПРУ характерно увеличение концентраций палладия с уменьшением магнезиальности и увеличением содержания  $TiO_2$  в породах. Однако в пределах палладиеносных пикритовых толщ наблюдается обратная закономерность: к подошве последних магнезиальность растёт вместе с увеличением концентраций палладия, наиболее высоких значений достигающих в приподошвенных частях пикритовых толщ. Здесь же обнаружена равномерно вкрапленная сульфидная минерализация на уровне ~5 %, что в полтора-два раза выше, чем в верхних частях пикритовой толщи. Сульфидная минерализация представлена халькопиритом, пиритом и в меньшей степени пирротинном. При этом за пределами рудоносных пикритовых тел концентрации палладия резко падают. Для всех пород характерна прямая корреляционная зависимость между концентрациями Cu и Pd, зависимость между содержаниями Ni и Pd не столь явная и отмечается преимущественно в поздних дифференциатах. Критерием выделения продуктивных горизонтов является преобладание сульфидов меди в сульфидной фазе приподошвенных частей пикритовых толщ.

5. Значимую роль в перераспределении ЭПГ играют многочисленные дайки плагиигранитов мощностью 1–5 м, пронизывающие продуктивные толщи Кулибинского ПРУ. В экзоконтактных частях таких даек отмечается существенное повышение концентраций ЭПГ. В отдельных случаях на контактах с плагиигранитами образуются метасоматиты, вмещающие рудную сульфидно-оксидную минерализацию до 50 об. %.

6. По комплексу признаков рудопроявления Кулибинского ПРУ обнаруживают сходство с малосульфидными платинометалльными месторождениями Балтийского щита. В качестве объекта-аналога можно рассматривать месторождение Контиярви (расслоенные интрузии комплекса Портимо, Финляндия) [Pijina, Maier, Karinen, 2015].

### Заключение

Малосульфидные платинометалльные месторождения в пределах Восточно-Саянской платино-никеленоносной провинции изучены слабо и представляют интерес в качестве нового перспективного типа месторождений в регионе. В работе рассмотрены петрогеохимические особенности платиноносных толщ Кулибинского ПРУ, разработаны геолого-геохимические критерии рудоносности мафит-ультрамафитовых комплексов региона. По комплексу признаков сделан вывод о схожести описанных образований с платинометалльными месторождениями комплекса Портимо (Финляндия), подобные объекты имеют промышленный интерес и в ходе освоения Восточно-Саянской провинции пополнят ее минерально-сырьевую базу.

### Список литературы

Возраст и природа вещества Кингашского ультрамафит-мафитового массива, Восточный Саян / И. Ф. Гертнер, В. В. Врублевский, О. М. Глазунов, П. А. Тишин, Т. С. Краснова, Д. Н. Войтенко // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 429, № 5. С. 645–651. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09090244>

*Гавриленко Б. В.* Минерагения благородных металлов и алмазов северо-восточной части Балтийского щита : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Апатиты, 2003. 399 с.

Геохимия и минералогия элементов платиновой группы в рудах Кингашского месторождения (Восточный Саян) / Т. А. Радомская, О. М. Глазунов, В. Н. Власова, Л. Ф. Суворова // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59, № 5. С. 363–384. <https://doi.org/10.1134/S107570151705004X>

*Глазунов О. М., Богнибов В. И., Еханин А. Г.* Кингашское платино-медно-никелевое месторождение. Иркутск : Изд-во ИГТУ, 2003. 192 с.

Коматииты и высокомагнезиальные вулканы раннего докембрия Балтийского щита / под ред. О. А. Богатикова. Л. : Наука, 1988. 192 с.

*Радомская Т. А.* Минералогия и геохимия Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения (В. Саян) : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 2012. 206 с.

Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение : в 2 т. / под ред. Ф. П. Митрофанова, В. Ф. Смолькина. Апатиты : Кольс. науч. центр РАН, 2004. 344 с.

Состав, строение и условия формирования метаосадочно-вулканогенных комплексов Канского зеленокаменного пояса (Северо-Западное Присяянье) / А. Д. Ножкин, О. М. Туркина, Е. В. Бибикина, В. А. Пономарчук // Геология и геофизика. 2001. Вып. 42, № 7. С. 1058–1078.

Чернышов А. И., Бабинцев Н. А., Ворошилов В. Г. Петрографические и минералогические особенности ультрамафитов Кирельского фрагмента Канского зеленокаменного пояса (СЗ Восточного Саяна) // Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Вып. 328, № 1. С. 75–88.

Andersen J. C. O., Power M. R., Momme P. Platinum-Group Elements in the Paleogene North Atlantic Igneous Province // The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements. 2002. Vol. 54. P. 637–667.

Barnes S.-J., Naldrett A. J., Gorton M. P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas // Chemical geology. 1985. Vol. 53. P. 303–323.

Barrie C. T., Naldrett A. J. The geology and tectonic setting of the Montcalm Gabbroic Complex and Ni-Cu deposit, Western Abitibi Subprovince, Ontario, Canada // Proc. of the 5th Magmatic Sulfides Conference. Harare, Zimbabwe : Special Publication Institution of Mining and Metallurgy, 1988. P. 151–164.

Chernyshov A. I., Nozhkin A. D., Mishenina M. A. Petrogeochemical Typification of the Ultramafic Rocks from the Idar Greenstone Belt, Kan Block, East Sayan // Geochemistry International. 2010. Vol. 48, N 2. P. 118–139. <https://doi.org/10.1134/S0016702910020023>

Condie K. C. Archaean greenstone belts. Amsterdam : Elsevier, 1981. 434 p.

Gresham J. J., Loftus-Hills G. D. The Geology of the Kambalda Nickel Field, Western Australia // Economic Geology. 1981. Vol. 76. P. 1373–1416.

Iljina M., Maier W. D., Karinen T. PGE-(Cu-Ni) deposits of the Tornio-Narankavaara belt of intrusions (Portimo, Penikat, and Koillismaa) // Mineral deposits of Finland. Amsterdam : Elsevier, 2015. P. 133–164.

Naldrett A. J. Magmatic Sulfide Deposits. New York : Oxford University Press, 1989. 196 p.

Naldrett A. J., McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chemical geology. 1995. Vol. 120. P. 223–253.

Naldrett A. J., Turner A. R. The geology and petrogenesis of a greenstone belt and related nickel sulfide mineralization at Yakabindi // Western Australia: Precambrian Research. 1977. Vol. 5. P. 43–103.

## Petrogeochemical Features of PGE-Bearing Metapicrites from Kulibinsky Potential Ore Territory (East Sayan)

N. A. Babintsev

*Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources, Krasnoyarsk  
National Research Tomsk State University, Tomsk*

A. I. Chernyshov

*National Research Tomsk State University, Tomsk*

**Abstract.** The objects of the study are mafic-ultramafic complexes of Kulibinsk potential ore unit, including intrusive bodies of kingashsk complex and metavolcanic rocks of kuliginiskaya and kuzinskaya series; studied objects are located at the north-west edge of Kansk greenstone belt in East Sayan. The relevance of the study is due to the appearance of new data on geological formations of the Kansk Greenstone Belt, which are the object of extensive discussions. Studied Kulibinsk potential ore unit (POT) is a north-west part of Kansk greenstone belt. Its territory is composed of rocks from volcanic-sedimentary complexes, which are composed of orthoamfibolites, orthogneisses, and different metasedimentary rocks with mineral associations of epidote-amphybolic and amphybolic facies of metamorphism. Metavolcanic strata intruded with mafic-ultramafic bodies of magmatic kingash and restitic idarsk complexes. Based on the results of the study, it was established that prospects of the territory associated with low-sulfidic type of PGE (platinum-group elements) mineralization, which founded in mafic-ultramafic bodies of kingashsk dunite-verlitenite-picritic magmatic complex. The nature of the geochemical zonality and the position of platinum-mineralization are typical for known mag-

matic platinum-metal deposits in stratified mafic-ultramafic complexes, which were formed during the differentiation of the initial high-magnesian picritic melt in repeatedly occurring intermediate magmatic chambers. In the productive part of the ore-bearing bodies of meta-picrites, the magnesia concentration is gradually growing down the section, which is reflected in the change of the mineral composition. At the top of the bodies, these rocks are close in chemical and mineral composition to picritic basalts, and in the bottom – to hi-Mg olivine picrites. The rocks of Kulibinsk POT are characterized by an increase of Pd concentrations with a decrease of MgO and an increase in the TiO<sub>2</sub> content in rocks, but within the PGE-bearing picritic strata, an inverse regularity is observed: downward along the section MgO grows together with an increase in the concentrations of palladium. A direct correlation between the Cu and Pd concentrations is typical for all rocks, correlation between the Ni and Pd contents is not so clear and is noted only in the late differentiates. The criteria for the separation of productive horizons is the predominance of copper sulphides in the sulfide phase of the bottom parts from the picritic strata. Numerous dykes of plagiogranites, penetrating the productive strata of the Kulibinsky distribution substation, have a significant effect on the redistribution of Pd. In the exocontact parts of such dikes, there is an increase in the concentration of PGE. In some cases, metasomatites are formed on contacts with plagiogranites, containing ore sulphide-oxide mineralization up to 50 %. By the set of signs, PGE-metal deposits of Portimo complex (Finland) proposed as the object-analogue.

**Keywords:** ultramafites, picrite, platinum, palladium, PGE, low-sulfidic PGE deposits, greenstone belt.

**For citation:** Babintsev N.A. Chernyshov A.I. Petrogeochemical Features of PGE-Bearing Metapicrites from Kulibinsky Potential Ore Territory (East Sayan). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2018, vol. 26, pp. 3-17. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.3> (in Russian)

## References

- Gertner I.F., Vrublevskii V.V., Glazunov O.M., Tishin P.A., Krasnova T.S., Voitenko D.N. Age and source material of the Kingash ultramafic-mafic massif, east sayan. *Doklady earth sciences*, 2009, vol. 429, no. 2, pp. 1526-1532. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09090244>
- Gavrielenko B.V. *Minerageniya blagorodnikh metallov I almazov severo-vostochnoy chasti Baltiiskogo shchita* [Minerageny of noble metals and diamonds of north-east part of Baltic shield]. Thesis of diss. for the degree of doc. of geol.-min. sc. Apatites, 2003, 399 p. (in Russian)
- Radomskaya T.A., Glazunov O.M., Vlasova V.N., Suvorova L.F. Geochemistry and mineralogy of platinum group element in ores of the Kingash deposit, Eastern Sayan, Russia. *Geology of ore deposits*, 2017, vol. 59, no. 5, pp. 354-374. <https://doi.org/10.1134/S107570151705004X> (in Russian)
- Glazunov O.M., Bognibov V.I., Ekhanin A.G. *Kingashskoe platino-medno-nikelevoe mestorojdenie* [Kingash platinum-copper-nickel deposit]. Irkutsk, 2003, 192 p. (in Russian)
- Komatiiti I visokomagnezialnie vulkaniti rannego dokembriya* (Precambrian komatiites and high-magnesian volcanites of Baltic shield). Leningrad, Nauka Publ, 1988, 192 p. (in Russian)
- Radomskaya T.A. *Mineralogy and geochemistry of Kingash platinum-copper-nickel deposit (E. Sayan)*, diss. for the degree of candidate of geol.-min. sc. Irkutsk, 2012, 206 p.
- Rassloyennye intruzii Monchegorskogo rudnogo rayona: petrologiya, orudnenie, izotopia, glubinnoe stroenie* [Layered intrusions of Monchegorsk ore region: petrology, ore-potential, isotopia, deep structure], in 2 vol. By the red. of Ph.P. Mitrophanov, V.Ph. Smolkin. Apatites, Kolsk science centre of RAS, 2004, 344 p. (in Russian)
- Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bibikova E.V., Ponomarchuk V.A. *Sostav, stroenie I usloviya formirovaniya metaosadochno-vulkanogennikh kompleksov Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Severo-Zapadnoe Prisanie)* [Constitution, structure and conditions of forming metasedimentary-volcanic complexes of Kansk greenstone belt (North-West Sayan)]. *Geology and geophysics*, 2001, vol. 42, no. 7, pp. 1058-1078. (in Russian)
- Chernyshov A.I., Babintsev N.A., Voroshilov V.G. Petrographical and mineralogical features of ultramafites from Kirelsk fragment of Kansk greenstone belt (NW of the East Sayan).

*Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 75-88. (in Russian)

Andersen J.C.O., Power M.R., Momme P. Platinum-Group Elements in the Paleogene North Atlantic Igneous Province. *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements*. 2002, vol. 54, pp. 637-667.

Barnes S.-J., Naldrett A.J., Gorton M.P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical geology*, 1985, vol. 53, pp. 303-323.

Barrie C.T., Naldrett A.J. The geology and tectonic setting of the Montcalm Gabbroic Complex and Ni-Cu deposit, Western Abitibi Subprovince, Ontario, Canada. *Proc. of the 5th Magmatic Sulfides Conference*. Harare, Zimbabwe, Special Publication Institution of Mining and Metallurgy, 1988., pp. 151-164.

Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrogeochemical Typification of the Ultramafic Rocks from the Idar Greenstone Belt, Kan Block, East Sayan. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 118-139. <https://doi.org/10.1134/S0016702910020023>

Condie K.C. *Archaean greenstone belts*. Amsterdam, Elsevier, 1981, 434 p.

Gresham J.J., Loftus-Hills G.D. The Geology of the Kambalda Nickel Field, Western Australia. *Economic Geology*, 1981, vol. 76, pp. 1373-1416.

Ijina M., Maier W.D., Karinen T. PGE-(Cu-Ni) deposits of the Tornio-Narankavaara belt of intrusions (Portimo, Penikat, and Koillismaa). *Mineral deposits of Finland*. Amsterdam, Elsevier, 2015, pp. 133-164.

Naldrett A.J. *Magmatic Sulfide Deposits*. New York, Oxford University Press, 1989, 196p.

Naldrett A.J., McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth. *Chemical geology*, 1995, vol. 120, pp. 223-253.

Naldrett A.J., Turner, A.R. The geology and petrogenesis of a greenstone belt and related nickel sulfide mineralization at Yakabindi. *Western Australia: Precambrian Research*, 1977, vol. 5, pp. 43-103.

**Бабинцев Никита Анатольевич**

старший геолог, лаборатория  
геохимических методов  
Красноярский научно-исследовательский  
институт геологии и минерального сырья  
Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 55  
аспирант, кафедра петрографии  
Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
e-mail: mas9915@mail.ru  
тел.: (3822)52-94-45

**Babintsev Nikita Anatolyevich**

Senior Geologist, Laboratory  
of Geochemical Methods  
Krasnoyarsk Research Institute of Geology  
and Mineral Resources  
55, Mir av., Krasnoyarsk, 660049,  
Russian Federation  
Postgraduate, Department of Petrography  
National Research Tomsk State University  
36, Lenin av., Tomsk, 634050, Russian  
Federation,  
e-mail: mas9915@mail.ru  
tel.: (3822)52-94-45

**Чернышов Алексей Иванович**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор, заведующий  
кафедра петрографии  
Национальный исследовательский Том-  
ский государственный университет  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
e-mail: aich@ggf.tsu.ru  
тел.: (3822)52-94-45

**Chernyshov Aleksey Ivanovich**

Doctor of Sciences (Geology and  
Mineralogy), Professor, Head  
Petrography Department  
National Research Tomsk State University  
36, Lenin av., Tomsk, 634050,  
Russian Federation  
e-mail: aich@ggf.tsu.ru  
tel.: (3822)52-94-45

Дата поступления: 25.06.2018

Received: June, 25, 2018