

УДК 552.321.6:553.08

ЭВОЛЮЦИЯ СУЛЬФИДНОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ КИНГАШСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (СЕВЕРО-ЗАПАД ВОСТОЧНОГО САЯНА)

Юричев Алексей Николаевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры петрографии
геолого-географического факультета Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

Объектом исследования является сульфидная минерализация пород Кингашского дунит-верлит-пикритового массива, представляющего собой петротип одноименного ультрамафитового комплекса в Канской глыбе (северо-западная часть Восточного Саяна) и включающего одноименное крупное Cu-Ni с ЭПГ месторождение. Несмотря на повышенный интерес многих исследователей к массиву, ряд вопросов его петрологической природы, а также механизмы формирования и локализации в нем Pt-Cu-Ni руд по настоящее время остаются дискуссионными. В настоящей статье предпринята попытка проследить эволюцию вещественного состава сульфидного расплава в процессе формирования пород исследуемого массива и их последующих метаморфических изменений. Представлены типоморфизм, минеральный и химический состав сульфидных минералов. Проведенные исследования показывают, что сульфидная минерализация пространственно связана со всеми породами Кингашского массива, но промышленные количества руды установлены преимущественно в дунитах. Особенности состава сульфидной ассоциации указывают на высокую железистость в целом кингашской рудно-магматической системы и сближают ее с медно-никелевыми месторождениями раннего протерозоя. Генетической особенностью сульфидного рудообразования Кингашского массива является относительно быстрое снижение температуры сульфидного расплава без значительного его фракционирования в процессе высокой скорости транспортировки магмы из мантийного очага в верхние этажи литосферы. Типоморфные особенности и химический состав сульфидных минералов, их соотношение и парагенезис позволили предположить два этапа в формировании отмеченной минерализации (магматический и низкотемпературный эпимагматический), а также реконструировать эволюцию сульфидного расплава по мере кристаллизации пород массива.

Ключевые слова:

Кингашский массив, ультрамафиты, сульфидная минерализация, химизм, эволюция расплава.

Введение

Ультрамафитовые и мафит-ультрамафитовые массивы считаются производными мантийных расплавов и несут не только ценную информацию о глубинных зонах Земли, но и позволяют проследить эволюцию ультраосновного и основного магматизма. С ними связаны месторождения хромитовых, медно-никелевых сульфидных руд, элементов платиновой группы (ЭПГ) и др.

Ультрамафиты и мафиты различной формационной принадлежности пользуются значительным распространением в пределах Канской глыбы Восточного Саяна. Они картируются в виде многочисленных массивов, чаще небольших размеров, и привлекают внимание многих исследователей в связи с их потенциальной рудоносностью [1–8]. Однако формационная принадлежность и металлогеническая специализация данных объектов часто оказываются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения.

Объектом настоящего исследования является сульфидная минерализация Кингашского дунит-верлит-пикритового массива, являющегося эталонным объектом для одноименного ультрамафитового комплекса и включающего в себя одноименное крупное Cu-Ni с ЭПГ месторождение [9]. Несмотря на повышенный интерес в последние несколько десятилетий исследователей к массиву, остаются до конца нерешенными вопросы глубины его формирования, комагматичности ультраосновных и основных пород, условий формирования и локализации руд.

Ранее исследования рудной минерализации Кингашского массива были проведены В.Н. Князевым [10], Г.И. Шведовым с соавторами [11, 12], Т.А. Радомской [13]. Однако интерес первых двух исследователей был связан в основном с благороднометалльной минерализацией (в частности – с платиноидами), а сульфидное Cu-Ni оруденение охарактеризовано на уровне вещественного состава без отнесения его к конкретным породным разновидностям. В.Н. Князевым впервые получены данные по изотопам серы в рудах месторождения, а также доказана генетическая связь медно-никелевой и золото-сульфидной формаций Кингашского рудного района с единой рудогенерирующей системой раннепротерозойского возраста. Полученные особенности вещественного состава сульфидной ассоциации и распределение ЭПГ в Cu-Ni рудах позволили исследователю предположить, что кристаллизация сульфидной жидкости происходила при быстром ее охлаждении.

Т.А. Радомской по типоморфным особенностям выделены разновидности Pt-Cu-Ni руд и показаны особенности их минерального и химического составов, составлена карта минералогических типов руд. На основе химического состава пирротина исследователем, в противовес результатам В.Н. Князева, сделано предположение о медленном остывании сульфидного расплава [13. С. 12].

На основании полученных оригинальных результатов систематизированы ранее имеющиеся данные, а также впервые предпринята попытка, основываясь на возрастном выделении пород Кингашского массива и на изучении выявленной в

данных породах сульфидной минерализации, проследить эволюцию вещественного состава сульфидного расплава в процессе формирования пород исследуемого массива (от дунитов к пикритам) и их последующих метаморфических изменений.

Полученные результаты позволяют сосредоточить проведение поисковых и разведочных работ на Cu-Ni оруденение в многочисленных слабоизученных ультрамафитовых телах кингашского комплекса Канской глыбы Восточного Саяна.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Кингашский дунит-верлит-пикритовый комплекс (AR_2-PR_1) представлен линзовидными телами размером от нескольких десятков метров до 15 км при мощности от первых метров до 100 м и более, которые обычно имеют северо-западное простирание и развиты в составе метаморфизованной толщи Канского докембрийского выступа в южном складчатом обрамлении Сибирской платформы. Характерной особенностью пород комплекса является наличие в них кумулятивных и бластопорфировых структур, свидетельствующих об их образовании в гипабиссальных и субвулканических условиях [14].

Наиболее представительным и эталонным объектом этого комплекса является Кингашский массив, который неоднократно изучался многими исследователями [5, 9, 15–21] и включает в себя одноименное Cu-Ni с ЭПГ месторождение. Он отличается довольно сложным и неоднозначным внутренним строением, в связи с чем, несмотря на пристальное к нему внимание, многие аспекты его внутреннего строения и происхождения остаются дискуссионными. Одни исследователи относят его

к расслоенным интрузиям [9], другие считают его субвулканическим телом базальт-коматиитовой формации [17–21], третьи рассматривают его в качестве фрагмента кингашского базальт-коматиитового вулканического комплекса [16, 22], четвертые считают, что по формационным признакам массив больше соответствует полигенным комплексам, а не расслоенным интрузиям [15].

Кингашский массив в плане картируется в виде крупной линзы (3?0,7 км), вытянутой в северо-западном направлении, и имеет согласное залегание со структурой пород обрамления. Контакты его с вмещающей толщей тектонические [23]. Массив сложен ультрамафитами и габброидами, со значительным преобладанием первых. Ультрамафиты обнажаются в его северной части, а в южной они перекрываются габброидами (рис. 1).

Согласно нашим исследованиям, ультрамафитовая часть разреза массива сложена, преимущественно, кумулятивными дунитами и их серпентинизированными разностями, при этом верлиты и пикриты пользуются ограниченным распространением. Выделяемые породы не обнаруживают какой-либо стратификации в массиве, а распределяются хаотично. Можно предположить, что образование ультрамафитового тела осуществлялось в магматической камере в условиях активной тектонической обстановки, когда режим сжатия периодически сменялся растяжением. В моменты растяжения, очевидно, происходило пульсационное внедрение в камеру по образовавшимся в ней ослабленным зонам неоднородных по составу ультраосновных расплавов, которые возникли в результате магматической дифференциации в глубинных промежуточных магматических очагах.

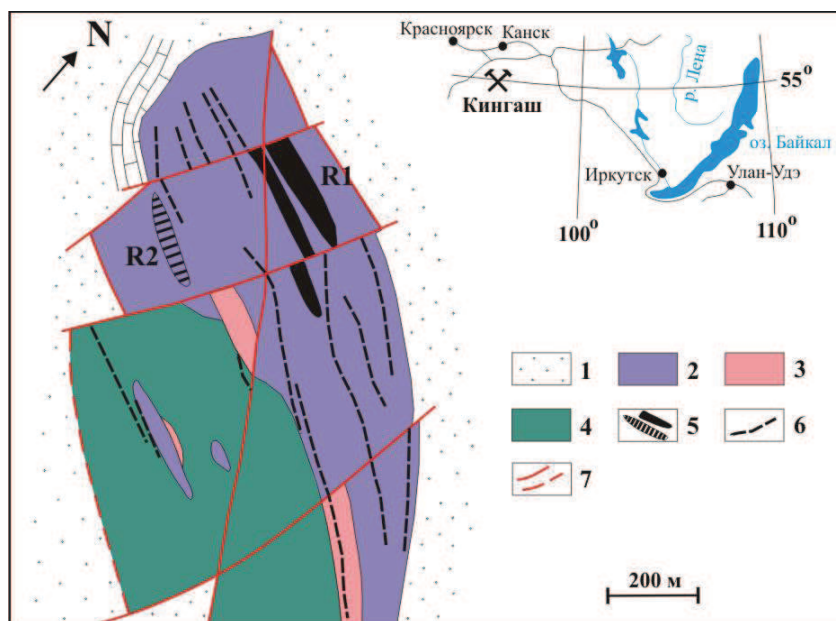


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кингашского массива (по [24]): 1 – позднеархейская бирюсинская свита, представленная амфиболитами и гнейсами с прослоями мраморов; 2, 3 – ультрамафиты: 2 – дуниты и верлиты, 3 – клинопироксениты; 4 – габбро; 5 – продуктивные платиноидные горизонты: разведанный (R1), предполагаемый (R2); 6 – отдельные тела с вкрапленной пентландит-пирротин-халькопиритовой минерализацией; 7 – тектонические нарушения

Габброиды, перекрывающие ультрамафиты, очевидно, представляют собой последующую, оторванную по времени, фазу внедрения, при этом наблюдаемые на контакте ультрамафитов и габброидов клинопироксениты, вероятно, являются реакционными образованиями [5].

Методика исследования

Рудные минералы в породах массива изучались в проходящем и отраженном свете на поляризационном микроскопе Axioscop 40 Pol. Анализ их вещественного состава, а также получение качественных изображений в отраженных электронах (режим BSE) [25] выполнен методом рентгеноспектрального микроанализа на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), аналитики А.С. Кульков, О.В. Бухарова. Для этого из отобранных образцов пород с рудной минерализацией были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3...4 мм по рекомендуемым методикам [25, 26]. Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b.

Сульфидная минерализация

Сульфидная минерализация содержится во всех ультраосновных породах массива. На последние приходятся все промышленные запасы никеля, меди, кобальта и благородных металлов Кингашского месторождения. Сульфидные руды преимущественно вкрапленные (интерстиционно-вкрапленные, гнездово-вкрапленные, сидеронитовые и шпирово-вкрапленные) и охватывают в разной степени все ультрамафиты месторождения (рис. 2). Жильные сульфидные руды (брекчиевидные, массивные и флюидально-полосчатые, прожилковые) распространены в ограниченном объеме (около 0,3 %), их мощность – до 1,5 м. В приповерхностной зоне месторождения развиты зона окисления и кора выветривания. Рудная минерализация также охватывает и породы экзоконтакта в виде вкрапленности и прожилков сульфидов.

Главными сульфидными минералами Кингашского массива являются пирротин, пентландит и халькопирит (рис. 2). Халькопирит занимает подчиненное положение. Второстепенные рудные минералы представлены кубанитом, маккинавитом, валлериитом, борнитом, халькозином, ковеллином, сфалеритом, галенитом, никелином, Си-пентландитом, кобальтином, виоларитом, паркеритом, маухеритом, герсдорфитом и др. [10].

Пирротин является наиболее распространенным сульфидом и отмечается как в ультрамафитах массива, так и во вмещающих его породах. Во

вкрапленной минерализации он представлен в виде двух полиморфных модификаций: троилита (FeS) и, в меньшей степени, гексагонального пирротина (Fe_{1-x}S), а в массивных и брекчиевидных рудах относится к гексагональной модификации (рис. 3, а). Размеры зерен пирротина во вкрапленных рудах составляют до 2 мм (рис. 2, б, ж, з). В жильных рудах его содержание значительно увеличивается, вплоть до образования мономинеральных прожилков мощностью до 0,8 мм.

Большинство проанализированных пирротинов стехиометричны по своему химическому составу (табл. 1), что, очевидно, может быть связано с быстрым остыванием сульфидного расплава [27]. Количество Fe в пирротинах уменьшается от ранних вкрапленных руд в дунитах к эпигенетическим брекчиево-жильным и сплошным рудам. По мере снижения отношения Fe/S в минерале отмечается увеличение содержаний Ni и Co (рис. 3, а). По геохимическим особенностям кингашские пирротины делятся на две группы. К первой относятся низкосернистые ($S=34,7...37,5\%$) и высокожелезистые ($\text{Fe}=62,4...64,6\%$) пирротины. Их характерной особенностью является крайне низкие содержания (до 0,2 %) или, нередко, полное отсутствие примесей Ni. Ко второй группе относятся высокосернистые ($S=38,2...39,4\%$) и низкожелезистые ($\text{Fe}=60,0...61,2\%$) пирротины с примесями Ni (до 1,0 %) (табл. 1).

Нередко в гипогенных условиях пирротин замещается валлериитом и магнетитом (рис. 2, з), а в гипергенных условиях – марказитом и пиритом.

Пентландит по содержанию в ультрамафитах и руде уступает пирротину. И только в рудных серпентинитах восточной части массива он является доминирующим сульфидным минералом. Минерал представлен двумя генерациями: первая (ранняя) в виде пламевидных включений в пирротине и вторая – в виде изометричных зерен и агрегатов в сростании с пирротинном и халькопиритом (рис. 2, б, е–з). Пентландит нередко образует интерстиционную вкрапленность зерен размером от 0,1 до 8 мм во вкрапленных рудах, а также отмечается в виде тонкой «сыпи» зерен размером менее 0,02 мм среди вторичных силикатов.

На диаграмме отношения S к $\text{Ni}/(\text{Ni}+\text{Fe})$ (рис. 3, б) фигуративные точки составов пентландитов образуют единый тренд, отражающий эволюцию химического состава минерала по мере дифференциации сульфидного расплава. В ультрамафитах интрузивного ряда (дунитах и верлитах) прослеживается тенденция к увеличению содержания Ni по мере уменьшения количества Fe и S, а в пикритовой серии пород – увеличение железистости и кобальтости по мере уменьшения содержания Ni (дефицит в системе) и S (рис. 3, б–в).

Высокие концентрации Ni обнаружены в пентландитах густо-вкрапленных и массивных руд халькопирит-пентландит-пирротиновой минеральной ассоциации. В целом по химизму минерал в породах Кингашского массива характеризуется повы-

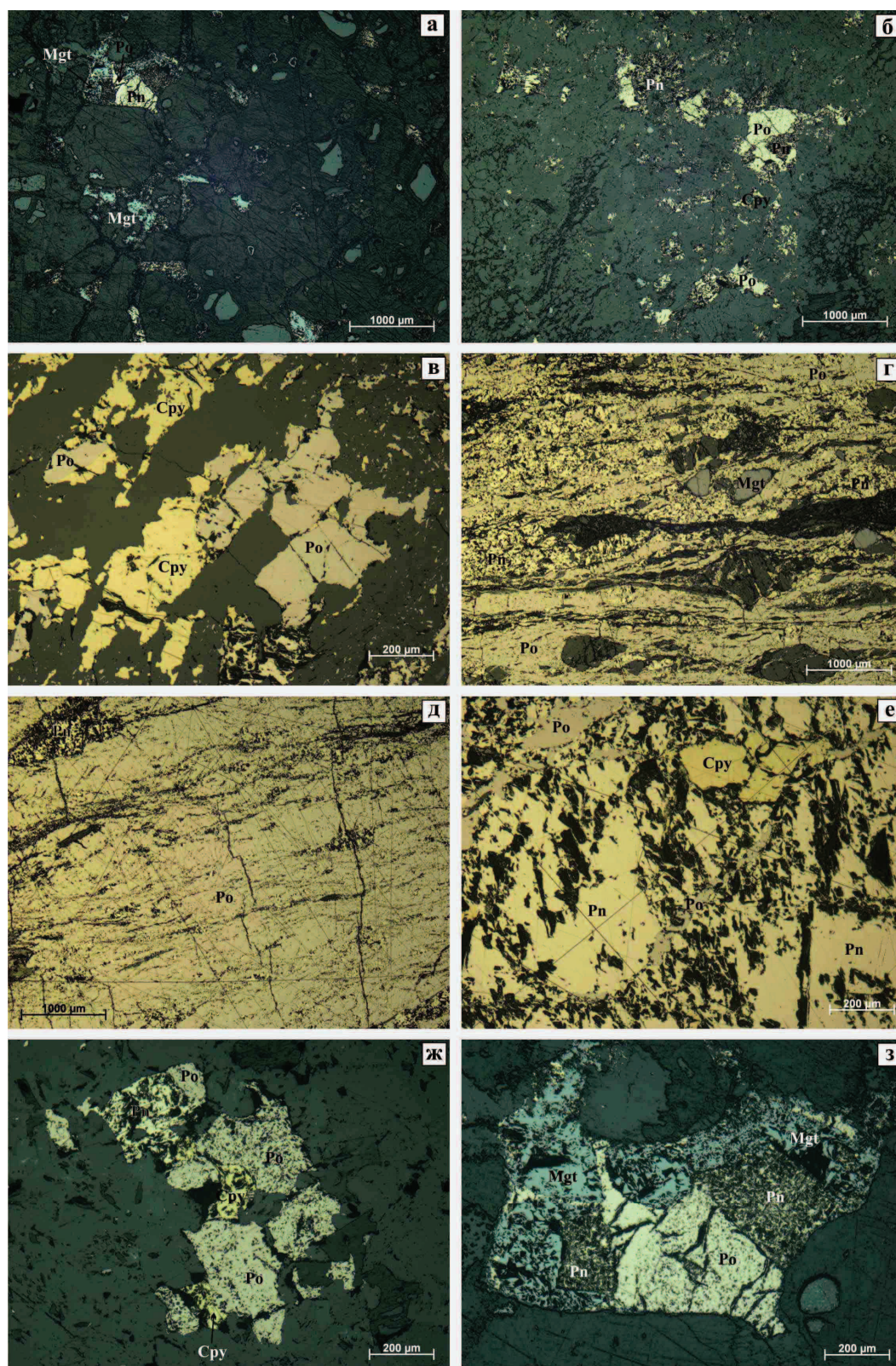


Рис. 2. Сульфидная минерализация Кингашского массива: а) интерстиционно-вкрапленные пентландит-пирротининовые руды (обр. 36A79,4-1); б, в) гнездово-вкрапленные руды: б) халькопирит-пентландит-пирротининовые (обр. PK25196,8), в) халькопирит-пирротининовые (обр. С-34Б-133,3-4); г) брекчиевидные халькопирит-пентландит-пирротининовые руды (обр. С-34Б-133,3-2); д, е) массивные (сливные) руды: д) пентландит-пирротининовые (обр. С-4Г-51.5-1), е) халькопирит-пентландит-пирротининовые (обр. С-4Г-51.5-3); ж) халькопирит-пентландит-пирротининовый парагенезис зерен (обр. С-16-175); з) пентландит-пирротининовый парагенезис зерен (обр. 36A79,4-2). Po – пирротин; Pn – пентландит; Cpy – халькопирит; Mgt – магнетит

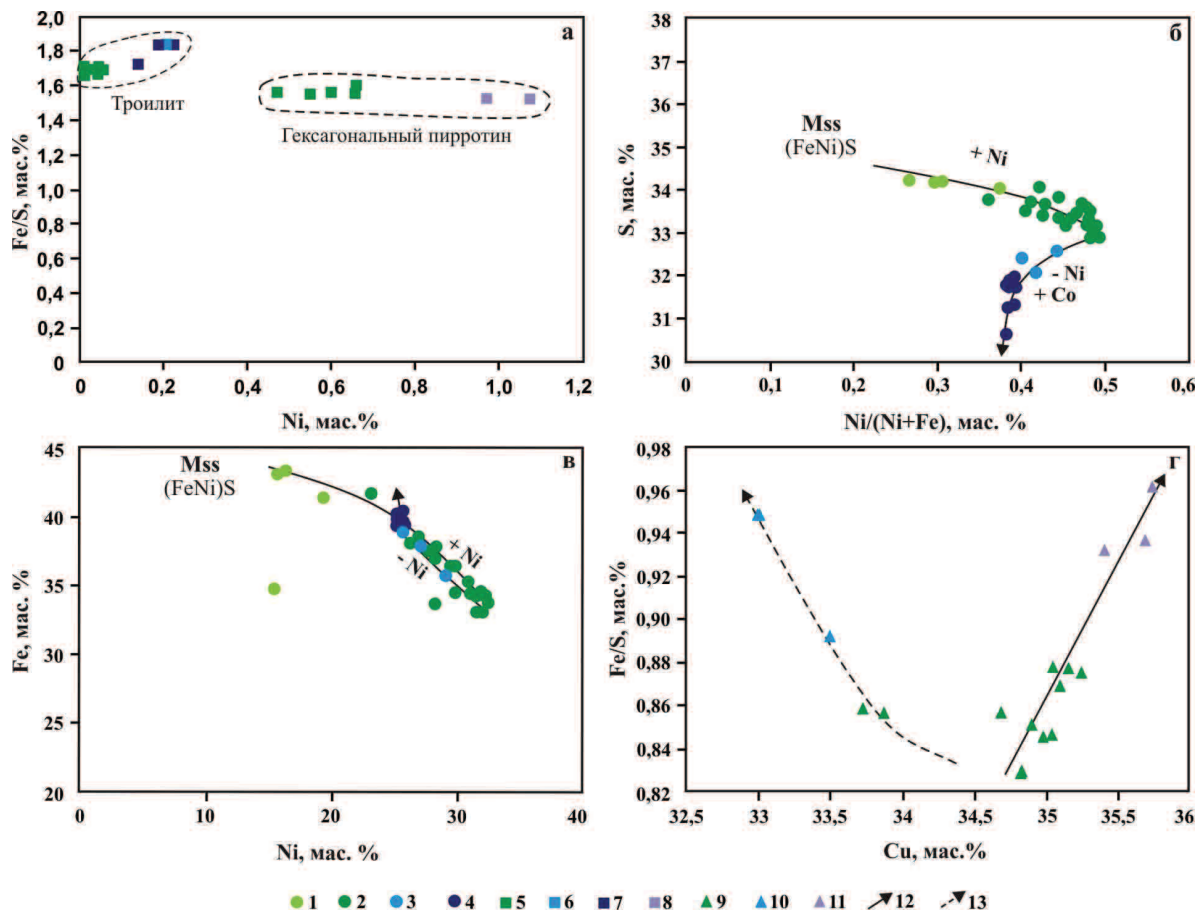


Рис. 3. Бинарные диаграммы для сульфидов из пород Кингашского массива: 1–4 – пентландиты: 1 – медистые, из дунитов, 2 – из дунитов и верлитов; 3 – из оливиновых пикритов, 4 – кобальтистые, из оливин-пироксеновых пикритов; 5–8 – пирротиты: 5 – из дунитов, 6 – из оливиновых пикритов, 7 – из оливин-пироксеновых пикритов, 8 – из пироксеновых пикритов; 9–11 – халькопириты: 9 – из дунитов, 10 – из оливиновых пикритов, 11 – из пироксеновых пикритов; 12, 13 – тренды эволюции сульфидного расплава: 12 – магматический, 13 – эпимагматический

шенной железистостью (таблица). Автором в процессе изучения отмечены кобальтистый и медистый пентландиты, с содержанием Co до 10 % и Cu до 15,6 % соответственно. При этом медистый пентландит из дунитов, судя по графическим построениям (рис. 3, б, в), является наиболее ранней и высокотемпературной разновидностью пентландитов.

Пентландит часто замещается магнетитом, реже – валлериитом и макинавитом.

Халькопирит распространен незначительно, преимущественно в массивных рудах (содержание во вкрапленных рудах – до 2 % от общего объема сульфидов, в массивных рудах – до 20 %) (рис. 2, в, е, ж). Он встречается в двух морфологических формах: зерна и прожилки в сульфидах или силикатах. Размеры зерен и агрегатов обычно не более 0,2 мм. Отношение Cu/Fe в них колеблется незначительно – 1,01...1,18. В магматических халькопиритах содержание Fe снижается прямо пропорционально уменьшению концентрации Cu (рис. 3, г). На бинарной диаграмме Fe/S к Cu также отмечается эпимагматический тренд, характеризующийся снижением в химическом составе халькопиритов содержаний Cu при возрастании роли Fe. Данное

обстоятельство, очевидно, обусловлено высвобождением Cu из халькопиритов под действием метасоматоза с последующей кристаллизацией сосуществующего рядом кубанита. В качестве микропримеси в халькопирите присутствует Ni (от следов до первых процентов).

Халькопирит замещается магнетитом, валлериитом, макинавитом и ковеллином.

В породах Кингашского массива в брекчиевидных рудах нередко отмечается **кубанит**, где его содержание может достигать 10 % [10]. Он обычно находится в тесной ассоциации с халькопиритом и развивается по трещинам в сульфидах и силикатах. Размер самостоятельных зерен достигает до 0,3 мм.

Обсуждение результатов и выводы

Проведенные исследования показывают, что сульфидная минерализация пространственно связана со всеми породами Кингашского массива, но промышленные количества медно-никелевых руд с ЭПГ установлены преимущественно в дунитах.

В сульфидной ассоциации преобладают троилит, гексагональный пирротин и пентландит (до 80...90 % от общего объема сульфидов), в подчинен-

Таблица. Средний химический состав сульфидных минералов в породах Кингашского массива, мас. %

Минерал	Порода	N	S	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Pb
Си-пентландит	Дунит	4	33,92	39,05	16,94	0,14	9,93	–	–
Пентландит	Дунит	20	33,37	34,76	30,48	1,18	0,07	–	–
Пентландит	Ол пикрит	3	32,40	37,68	27,31	2,61	–	–	–
Со-пентландит	Дунит	2	33,84	26,48	30,14	9,55	–	–	–
Со-пентландит	Ол-Рх пикрит	7	31,57	39,63	25,29	3,51	–	–	–
Пирротин	Дунит	23	37,73	62,57	0,03	0,03	0,04	–	–
Пирротин	Ол пикрит	2	35,87	63,62	–	–	–	–	–
Пирротин	Ол-Рх пикрит	9	35,71	63,89	0,18	0,35	–	–	–
Пирротин	Рх пикрит	2	38,95	60,02	1,02	–	–	–	–
Халькопирит	Дунит	5	34,73	30,23	0,48	0,03	34,55	–	–
Халькопирит	Ол пикрит	2	34,77	31,98	–	–	33,25	–	–
Халькопирит	Рх пикрит	3	33,14	31,26	–	–	35,60	–	–
Пирит	Ол пикрит	3	53,28	46,23	–	–	–	–	–
Пирит	Рх пикрит	3	53,31	46,61	–	–	–	–	–
Пирит	Амф пикрит	3	52,75	46,73	–	0,78	–	–	–
Со-пирит	Ол пикрит	2	52,44	44,49	0,97	2,57	–	0,01	–
Макинавит	Дунит	7	36,59	57,73	4,82	0,48	0,38	–	–
Макинавит	Ол-Рх пикрит	1	36,90	57,40	3,18	2,20	–	0,11	–
Кубанит	Дунит	2	35,86	39,39	0,01	0,01	24,73	–	–
Галенит	Дунит	4	13,16	0,22	–	–	0,12	–	86,49
Галенит	Ол пикрит	1	13,47	1,78	–	–	–	–	84,75
Сфалерит	Дунит	1	35,11	9,44	0,05	0,03	1,08	54,11	0,03
Сфалерит	Ол-Рх пикрит	2	30,57	5,94	0,19	–	–	63,30	–

Примечание: Определение химического состава осуществлялось на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск) операторами А.С. Кульковым, О.В. Бухаровой. Ол пикрит – оливиновый пикрит; Ол-Рх пикрит – оливин-пироксеновый пикрит; Рх пикрит – пироксеновый пикрит; Амф пикрит – амфиболовый пикрит; N – число анализов.

ном количестве присутствует халькопирит, крайне редко отмечается кубанит. Сульфиды железа представлены преимущественно гексагональным пирротинном и троилитом, примесь Ni в которых не превышает 1,08 % (таблица). В отдельных образцах отмечен макинавит с содержанием Ni до 4,69 % и Co до 1,0 %, а также медистый пентландит с содержанием Си до 15,62 % (таблица). Пентландит имеет железистый состав и содержит Co до 3,8 %. Такие особенности состава сульфидной ассоциации с участием троилита, макинавита и постоянно железистый состав пентландита указывают на высокую железистость в целом кингашской рудно-магматической системы и сближает ее с медно-никелевыми месторождениями раннего протерозоя [27].

Как генетическую особенность сульфидного рудообразования Кингашского массива следует отметить относительно быстрое снижение температуры в рудно-магматической системе, что подтверждается присутствием заметного количества медистого пентландита, повышенных содержаний Ni в халькопирите, а также стехиометричностью пирротина и пентландита по их химическому составу. В пользу быстрого охлаждения сульфидного расплава свидетельствует и состав минералов платиновой группы: большинство их содержит примеси тяжелых ЭПГ (Os, Ir, Rh, Ru) [11, 12], что свидетельствует об отсутствии «разгонки» платиновых металлов, характерной для многих месторождений. Данный вывод подтверждает ранее высказан-

ное предположение В.Н. Князева и опровергает точку зрения о медленном остывании сульфидного расплава Т.А. Радомской.

Помимо этого состав сульфидной минерализации массива свидетельствует о ее кристаллизации из высокотемпературного сульфидного расплава без значительного его фракционирования в процессе высокой скорости транспортировки магмы из мантийного очага в верхние этажи литосферы. Данное утверждение хорошо согласуется с установленной для Кингашского массива геодинамической обстановкой формирования – в условиях океанического рифта [24]. Подобная обстановка обеспечивала благоприятные условия для быстрой транспортировки ультраосновной магмы от мантийного очага образования к поверхности [28].

Типоморфные особенности и химический состав сульфидных минералов, их соотношение и парагенезис позволяют предполагать два этапа в формировании отмеченной минерализации (магматический и низкотемпературный эпимагматический), а также реконструировать эволюцию сульфидного расплава по мере кристаллизации пород массива.

По наблюдениям автора вкрапленная пирротин-пентландит-халькопиритовая минерализация в ультрамафитах является первично-магматической. Образование сульфидной триады, очевидно, происходило из сульфидного расплава, обогащенного железом, который в процессе ликвации выде-

лился из исходной высокомагнезиальной пикритовой магмы. Такой моносльфидный твердый раствор (Mss) в условиях высоких температур растворяет весь содержащийся никель и является гомогенным. При понижении температуры из него происходит близкая по времени кристаллизация пирротина и железистого пентландита, с образованием структур распада твердых растворов [29]. Данное предположение подтверждается анализом химических составов этих минералов.

Одновременно с кристаллизацией основных порообразующих силикатных минералов в магматическую стадию происходит сегрегация высокотемпературных Fe-Ni сульфидов, которые в виде сульфидных капель обнаружены в силикатной матрице. Этому процессу способствует присутствие в расплаве S, P и летучих компонентов (F, H₂O, Cl) [13]. При этом постепенно во фракционирующем сульфидном расплаве концентрируется и обособляется Cu и Ni. Накопление первого в итоге приводит к кристаллизации фаз халькопирита, как в составе триады, так и в виде самостоятельных зерен; а Ni – к возрастанию его роли в кристаллизующихся зернах пентландита и пирротина.

Концентрация сульфидных капель в дунитах придонной части массива при участии механизма ликвации и под действием силы гравитации (транспортно-гравитационная модель накопления сульфидов) [27] приводит к появлению густо вкрапленных богатых Cu-Ni руд.

Сульфидная минерализация в породах пикритовой серии (оливиновых и оливин-пироксеновых пи-

критях) представлена в основном каплевидными пирротин-пентландитовыми включениями, причем, в последних эта минерализация более частая и достигает до 7...8 % от объема породы. Пониженное содержание Ni в пентландах из оливиновых пикритов по отношению к пентландам из дунитов и верлитов и последующее уменьшение его содержания в пентландах из оливин-пироксеновых пикритов, вероятно, указывает на дефицит данного элемента в сульфидной системе. Данный факт, очевидно, является следствием значительного поглощения Ni при кристаллизации более ранних дифференциатов – кумулятивных дунитов. В сульфидном производном расплаве, образовавшемся при кристаллизации пикритов, происходит возрастание в системе роли Co, который изоморфно восполняет «нехватку» Ni. При этом образуются высококобальтовые пентландиты, которые формируются при кристаллизации оливиновых и оливин-пироксеновых пикритов. В поздних наиболее дифференцированных пироксеновых и амфиболовых пикритах они отсутствуют, однако из остаточного сульфидного расплава происходила кристаллизация самостоятельных зерен халькопирита и пирита.

Брекчиево-жильные и массивные пентландит-халькопирит-кубанит-пирротиновые руды, крупные халькопиритовые и пиритовые агрегативные выделения, макинавит, сфалерит и галенит формировались в эпимагматический этап, когда сульфидная жидкость под действием процессов метасоматоза интродировала по зонам трещиноватости в породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платиноносность ультрабазит-базитовых комплексов Юга Сибири / под ред. В.И. Богникова, А.П. Кривенко, А.Э. Исоха и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 1995. – 151 с.
2. Юричев А.Н. Мафит-ультрамафитовый магматизм Канской глыбы и его рудный потенциал, Северо-Запад Восточного Саяна // Руды и металлы. – 2013. – № 3. – С. 11–20.
3. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Конников Э.Г. Талажинский плагиодунит-троктолит-анортозит-габбровый массив Восточного Саяна: петрогеохимические особенности и проблемы рудоносности // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 2. – С. 219–236.
4. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация идарского дунит-гарцбургитового комплекса (Северо-Запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 69–75.
5. Чернышов А.И., Ножкин А.Д., Мишенина М.А. Петрохимическая типизация ультрамафитов Канского блока (Восточный Саян) // Геохимия. – 2010. – № 2. – С. 1–25.
6. Юричев А.Н. Кулибинский и нижнедербинский комплексы: общность геохимических черт (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 123–129.
7. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация перидотитов и габброидов кулибинского комплекса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 64–70.
8. Чернышов А.И., Мишенина М.А. Петроструктурная типизация ультрамафитов Канского зеленокаменного пояса (северо-запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 19–24.
9. Глазунов О.М., Богнибов В.И., Еханин А.Г. Кингашское платиноидно-медно-никелевое месторождение. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2003. – 192 с.
10. Князев В.Н. Геология и условия образования благороднометаллового и медно-никелевого оруденения Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян): дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Красноярск, 2004. – 145 с.
11. Минералогия и платиноносность медно-никелевых руд Кингашского массива (Восточный Саян) / Г.И. Шведов, А.В. Тарасов, В.В. Некос, В.Н. Князев // Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов. – Сыктывкар: Геопринт, 1998. – С. 106.
12. Минералы элементов платиновой группы в сульфидных медно-никелевых рудах Кингашского массива (Восточный Саян) / Г.И. Шведов, Н.Д. Толстых, В.В. Некос, Л.Н. Поспелова // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 11. – С. 1842–1848.
13. Радомская Т.А. Минералогия и геохимия Кингашского платиноидно-медно-никелевого месторождения (В. Саян): автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2012. – 23 с.
14. Коматииты и высокомагнезиальные вулканы раннего докембрия Балтийского щита. – Л.: Наука, 1988. – 192 с.
15. Гертнер И.Ф., Врублевский В.В., Глазунов О.М. и др. Возраст и природа вещества Кингашского ультрамафит-мафитового массива, Восточный Саян // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 429. – № 5. – С. 645–651.
16. Корнев Т.Я., Еханин А.Г. Эталон Кингашского базальт-коматиитового комплекса (Восточный Саян). – Новосибирск: СНИИГТМиС, 1997. – 88 с.
17. Петрографические особенности ультрамафитов Кингашского Cu-Ni-Pt-месторождения (СЗ Восточного Саяна) / А.И. Черны-

- шов, Н.И. Кузоватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, С.И. Ступаков // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Матер. Всерос. науч. конф. Вып. 2. – Томск, 2001. – С. 266–280.
18. Геологическое положение Кингашского ультрамафитового массива в структурах Восточного Саяна и его внутреннее строение / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, Н.И. Кузоватов // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Матер. Всерос. науч. конф. – Томск, 2002. – Вып. 3. – С. 141–150.
 19. Кингашский мафит-ультрамафитовый массив: геологическое положение, внутреннее строение, вещественный состав и петроструктурный анализ ультрамафитов (Восточный Саян) / А.И. Чернышов, А.Д. Ножкин, С.И. Ступаков, П.А. Балыкин, Н.И. Кузоватов, И.Г. Резников, Н.А. Третьяков, В.А. Прохорова // Платина России. Проблемы развития, оценки воспроизводства и комплексного использования минерально-сырьевой базы платиновых металлов. Т. V. – М.: ООО «Геоинформ-марк», 2004. – С. 152–175.
 20. Сульфидно-никелевое и благороднометалльное оруденение в гранит-зеленокаменной области Восточного Саяна / А.Д. Ножкин, М.Ю. Цыпуков, В.А. Попереков, А.Н. Смагин, А.В. Ренжин // Отечественная геология. – 1995. – № 6. – С. 11–17.
 21. Коматит-базальтовая ассоциация Канского зеленокаменного пояса (Восточный Саян) / М.Ю. Цыпуков, А.Д. Ножкин, В.А. Бобров, Ю.Г. Шилицын // Геология и геофизика. – 1993. – № 8. – С. 98–108.
 22. Канский зеленокаменный пояс и его металлогения (Восточный Саян) / Т.Я. Корнев, А.Г. Еханян, А.П. Романов, В.Н. Князев. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – 134 с.
 23. Амфиболит-гнейсовые комплексы зеленокаменных поясов Канской глыбы: геохимия, реконструкция протолитов и условий их образования (Восточный Саян) / А.Д. Ножкин, О.М. Туркина, В.А. Бобров, А.Д. Киреев // Геология и геофизика. – 1996. – № 12. – С. 30–41.
 24. Глазунов О.М. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы цветных металлов в Саянской никель-платиноносной провинции // Минерально-сырьевая база цветных металлов: Труды I Междунар. конгресса. – Красноярск, 2009. – С. 19–24.
 25. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
 26. Taylor C.M., Radtke A.S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis // Econ. Geol. – 1965. – № 65. – P. 1306–1319.
 27. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд. – СПб.: СПбГУ, 2003. – 487 с.
 28. Налдретт А.Дж. Геологические обстановки, благоприятные для нахождения магматических сульфидных руд // Руды и металлы. – 2002. – № 5. – С. 33–47.
 29. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М.: Иностран. лит-ра, 1962. – 1132 с.

Поступила 14.10.2013 г.

UDC 552.321.6:553.08

EVOLUTION OF SULFIDE LIQUID AT KINGASHSKY ULTRAMAFIC MASSIF FORMATION (NORTH-WEST OF EASTERN SAYAN)

Alexey N. Yurichev,

Cand. Sc., Tomsk State University,

Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

The study subject of the paper is the sulphide mineralization of rocks of the Kingashsky dunite-wehrilite-picritic massif, which is the standard of an object of ultramafic complex in the Kan block (north-western part of the Eastern Sayan) with the same name and which includes eponymous large Cu-Ni deposit with PGE. Despite the increased interest of many researchers to the massif, a number of issues on its petrological nature and mechanisms of formation and localization of Pt-Cu-Ni ores in it are still controversial. The paper attempts to trace the evolution of the material composition of sulfide melt at formation of the massif rocks and their subsequent metamorphic changes. The paper introduces typomorphism, mineral and chemical composition of sulfide minerals. The carried out studies show that sulphide mineralization is spatially associated with all breeds of Kingashsky array, but the ore industrial amounts are mainly found out in dunites. The features of sulfide association indicate high iron index in Kingashskaya ore-magmatic system as a whole and brings it closer to the copper-nickel deposits of the Early Proterozoic. The genetic feature of sulfide mineralization of the Kingashsky massif is relatively rapid temperature decrease of sulfide melt without its significant fractionation at high rate of magma transportation from the magmatic chamber into the upper floors of the lithosphere. Typomorphic characteristics and chemical composition of sulfide minerals, their relationship and paragenesis allowed supposing two stages in formation of the noted mineralization (magmatic and low temperature epimagmatic) as well as reconstructing the evolution of sulfide melt when crystallizing massif rocks.

Key words:

Kingashsky massif, ultramafites, sulfide mineralization, chemistry, evolution of liquid.

REFERENCES

1. Platinonost ultrabazit-bazitovykh kompleksov Yuga Sibiri [PGE mafic-ultramafic complexes of South Siberia]. Ed. by V.I. Bognibov, A.P. Krivenko, A.E. Izokh. Novosibirsk, SO RAN, GEO Publ., 1995. 151 p.
2. Yurichev A.N. Mafit-ultramafitovy magmatizm Kanskoy glyby i ego rudny potentsial, Severo-Zapad Vostochnogo Sayana [Mafic-ultramafic magmatism of Kan block and its ore potential, North-west Eastern Sayan]. *Rudy i metally*, 2013, no. 3, pp. 11–20.
3. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Konnikov E.G. Talazhinskiy plagioudit-troktolit-anortozit-gabbrovyy massiv Vostochnogo Sayana: petrogeokhimicheskie osobennosti i problemy rudonosti [The Talazhin plagioudite-troctolite-anorthosite-gabbro massif (East Sayan): petrogeochemistry and ore potential]. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 219–236.

4. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya idarskogo dunit-garzburgitovogo kompleksa (Severo-Zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of the Idarsky dunite-harzburgite complex (North-west Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 69–75.
5. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Mishenina M.A. Petrokhimicheskaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo bloka (Vostochny Sayan) [Petrogeochemical typification of the ultramafic rocks from the Idar greenstone belt, Kan block, East Sayan]. *Geochemistry International*, 2010, no. 2, pp. 1–25.
6. Yurichev A.N. Kulibinskiy i nizhnederbinskiy komplekсы: obshchnost geokhimicheskikh chert (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Kulibinsky and nizhnederbinskiy complexes: common geochemical features (North-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 123–129.
7. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya peridotitov i gabbroidov kulibinskogo kompleksa (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of peridotites and gabbros of the Kulibinsky complex (North-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 64–70.
8. Chernyshov A.I., Mishenina M.A. Petrostrukturnaya tipizatsiya ultramafitov Kanskogo zelenokamennogo poyasa (severo-zapad Vostochnogo Sayana) [Petrostructural typification of ultramafites of the Kan greenstone belt (North-west of the Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 19–24.
9. Glazunov O.M., Boghibov V.I., Ekhanin A.G. Kingashskoe platino-medno-nikelevoe mestorozhdenie [Kingashsky PGE-copper-nickel deposit]. Irkutsk, IGTU Publ., 2003. 192 p.
10. Knyazev V.N. *Geologiya i usloviya obrazovaniya blagorodnometalnogo i medno-nikelevogo orudneniya Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochny Sayan)*. Diss. Kand. Geologo-mineralogicheskikh nauk [Geology and formation conditions of noble metal and copper-nickel mineralization of the Kan greenstone belt (Eastern Sayan). Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2004. 145 p.
11. Shvedov G.I., Tarasov A.V., Nekos V.V., Knyazev V.N. Mineralogiya i platinonosnost medno-nikelevykh rud Kingashskogo massiva (Vostochny Sayan) [Mineralogy and platinum-bearing of copper-nickel ores of the Kingashsky massif (Eastern Sayan)]. *Zoloto, platina i almazy Respubliki Komi i soprodelnykh regionov* [Gold, platinum and diamonds of the Komi Republic and contiguous regions]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 1998. p. 106.
12. Shvedov G.I., Tolstykh N.D., Nekos V.V., Pospelova L.N. Mineraly elementov platinovoy gruppy v sulfidnykh medno-nikelevykh rudakh Kingashskogo massiva (Vostochny Sayan) [Minerals of platinum group elements in copper-nickel sulfide ores of the Kingashsky massif (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 11, pp. 1842–1848.
13. Radomskaia T.A. *Mineralogiya i geokhimiya Kingashskogo platino-idno-medno-nikelevogo mestorozhdeniya (V. Sayan)*. Avtoref. Diss. Kand. Geologo-mineralogicheskikh nauk [Mineralogy and geochemistry of the Kingashsky PGE-copper-nickel deposit (E. Sayan). Cand. Diss. abstract]. Irkutsk, 2012. 23 p.
14. Komatiiti i vysokomagnezialnye vulkanity rannego dokembriya Baltijskogo shchita [Komatiites and high-Mg volcanic rocks of the Early Precambrian of the Baltic Shield]. Leningrad, Nauka, 1988. 192 p.
15. Gertner I.F., Vrublevskiy V.V., Glazunov O.M. Vozrast i priroda veshchestva Kingashskogo ultramafit-mafitovogo massiva, Vostochny Sayan [Age and nature of matter of the Kingashsky ultramafic-mafic massif, East Sayan]. *Doklady Akademii nauk*, 2009, vol. 429, no. 5, pp. 645–651.
16. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G. *Etalon Kingashskogo bazalt-komatiitovogo kompleksa (Vostochny Sayan)* [Etalon of the kingashsky basalt-komatiitic complex (East Sayan)]. Novosibirsk, SNIIG-GiMS, 1997. 88 p.
17. Chernyshov A.I., Kuzovatov N.I., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Stupakov S.I. Petrograficheskie osobennosti ultramafitov Kingashskogo Cu-Ni-Pt-mestorozhdeniya (SZ Vostochnogo Sayana) [Petrographic features of ultramafites of the Kingashsky Cu-Ni-Pt deposit (NW Eastern Sayan)]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. All-Russian scientific conference]. Tomsk, 2001, Iss. 2, pp. 266–280.
18. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Kuzovatov N.I. Geologicheskoe polozhenie Kingashskogo ultramafitovogo massiva v strukturakh Vostochnogo Sayana i ego vnutrennee stroenie [Geological position of the Kingashsky ultramafic massif in the structures of the Eastern Sayan and its internal structure]. *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proc. All-Russian scientific conference]. Tomsk, 2002, Iss. 3, pp. 141–150.
19. Chernyshov A.I., Nozhkin A.D., Stupakov S.I., Balykin P.A., Kuzovatov N.I., Reznikov I.G., Tretyakov N.A., Prokhorova V.A. Kingashskiy mafit-ultramafitovy massiv: geologicheskoe polozhenie, vnutrennee stroenie, veshchestvenny sostav i petrostrukturny analiz ultramafitov (Vostochny Sayan) [Kingashsky mafic-ultramafic massif: geological position, internal structure, material composition analysis and petrostructural analysis of ultramafic (Eastern Sayan)]. *Platina Rossii. Problemy razvitiya, otsenki vosproizvodstva i kompleksnogo ispolzovaniya mineralno-syrevoy bazy platinovykh metallov* [Platinum of Russia. Problems of development, evaluation of reproduction and complex use of mineral resources base of the platinum metals]. Moscow, 2004, vol. V, pp. 152–175.
20. Nozhkin A.D., Tsypukov M.Yu., Poperekov V.A., Smagin A.N., Renzhin A.V. Sulfidno-nikelevoe i blagorodnometalnoe orudnenie v granit-zelenokamennoy oblasti Vostochnogo Sayana [Sulfide-nickel and noble-metal mineralization in the granite-greenstone field of the Eastern Sayan]. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 6, pp. 11–17.
21. Tsypukov M.Yu., Nozhkin A.D., Bobrov V.A., Shipitsyn Yu.G. Komatiit-bazaltovaya assotsiatsiya Kanskogo zelenokamennogo poyasa (Vostochny Sayan) [Komatiite-basalt association of the Kan greenstone belt (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1993, no. 8, pp. 98–108.
22. Kornev T.Ya., Ekhanin A.G., Romanov A.P., Knyazev V.N. *Kanskii zelenokamenny poyas i ego metallogeniya (Vostochny Sayan)* [Kan greenstone belt and its metallogeny (Eastern Sayan)]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2003. 134 p.
23. Nozhkin A.D., Turkina O.M., Bobrov V.A., Kireev A.D. Amfibolit-gneysovyye komplekсы zelenokamennykh poyasov Kanskoy glyby: geokhimiya, rekonstruktsiya protolitov i usloviy ikh obrazovaniya (Vostochny Sayan) [Amphibolite-gneiss complexes of greenstone belts of the Kan block: geochemistry, reconstruction protolith and conditions of their formation (Eastern Sayan)]. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, no. 12, pp. 30–41.
24. Glazunov O.M. Perspektivy rasshireniya mineralno-syrevoy bazy tsvetnykh metallov v Sayanskoy nikel-platinosnoy provintsii [Prospects for expanding mineral resource base nonferrous metals in Sayan nickel-platinum province]. *Mineralno-syrevaia baza tsvetnykh metallov. Trudy I Mezhdunarodnogo kongressa* [Mineral resource base. Proc. I International congress]. Krasnoyarsk, 2009, pp. 19–24.
25. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
26. Taylor C.M., Radtke A.S. Preparation and polishing of ores and mill products for microscopic examination and electron microprobe analysis. *Econ. Geol.*, 1965, no. 65, pp. 1306–1319.
27. Naldrett A.Dzh. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh i platinometalnykh rud* [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel and PGE ores]. Saint-Petersburg, SpbGU Publ., 2003. 487 p.
28. Naldrett A.Dzh. Geologicheskie obstanovki, blagopriyatnye dlya nakhozhdeniya magmaticheskikh sulfidnykh rud [Geological conditions favorable for finding magmatic sulfide ores]. *Rudy i metallurgy*, 2002, no. 5, pp. 33–47.
29. Ramdor P. *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore minerals and their intergrowths]. Moscow, Inostr. literatura, 1962. 1132 p.