

К МОДЕЛИ Cu-Ni РУДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ ЮЖНОЙ ЧАСТИ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА

А. В. Ерёменко, Д. В. Ерёменко, В. А. Жабин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 24 января 2014 г.

Аннотация: в статье кратко охарактеризованы особенности никеленосного магматизма южной Камчатки, а также представлены результаты исследований авторов, указывающие на двустадийность магмовыведения никеленосных пород дукукского комплекса. Первая стадия предполагает задержку ультрамафит-мафитовых магм на промежуточных глубинах с формированием магматических очагов, в которых происходит частичная ликвация и серпентинизация расплава. Вторая стадия характеризуется интрузивно-протрузивным отжимом обогащенного рудным компонентом вещества в приповерхностные участки коры за счет увеличения объема промежуточных очагов при серпентинизации.

Ключевые слова: дукукский комплекс, ликвация, серпентинизация, интрузивно-протрузивный отжим.

Abstract: this article shortly describes the features of the nickel-bearing magmatism in southern Kamchatka and reveals the research results of the article authors, which show a two-stage magma removal of the nickel-bearing rocks of the dukuskii complex. The first stage implies stopping the ultramafic-mafic magmas at some depths and forming the intervening magmatic chambers where the partial melt segregation and serpentinization occurs. The second stage defines the intrusive and the protrusive extraction of the substance enriched with ore components in the near-surface parts of the earth crust by increasing the amount of the intervening chambers during the serpentinization.

Key words: dukuskii complex, segregation, serpentinization, the intrusive and the protrusive extraction.

Для повышения эффективности всех стадий геологоразведочных работ необходима непротиворечивая модель Cu-Ni рудообразования, охватывающая максимально широкий круг вопросов структурного, вещественно-генетического и временного характера. Различные идеи, связанные с моделями рудообразования, изложены в обширной литературе, посвященной проблеме Cu-Ni оруденения в связи с мафит-ультрамафитами складчатых структур вообще [1, 2] и Камчатки в частности [3–12]. Главной структурой, с которой пространственно связаны тела, контролируемые медно-никелевое оруденение, является Срединный кристаллический массив Камчатки (СКМ).

В 2012–2013 гг. авторами были проведены полевые и камеральные работы в южной части СКМ, результаты которых позволили предположить, что СКМ принадлежит к комплексам метаморфических ядер кордильерского типа [4]. В свою очередь, это обязывает пересмотреть устоявшиеся представления о процессах рудообразования в магматитах дукукского комплекса. Кроме того, получен новый веществен-

ный фактический материал, позволяющий внести некоторые коррективы в существующие представления о модели Cu-Ni рудообразования.

Обзор существующих моделей медно-никелевого оруденения в связи с интрузивным магматизмом дукукского комплекса

Интрузивный магматизм в пределах СКМ представлен широким спектром составов (от ультраосновных до кислых). Ультрамафит-мафитовые образования представлены породами андриановского, левоандриановского, алисторского и дукукского комплексов.

Породы андриановского комплекса образуют пластовые тела мощностью до нескольких сотен метров, залегающие согласно с вмещающими образованиями. В составе комплекса преобладают плагиоклаз-амфиболовые сланцы, реже отмечаются амфиболиты и актинолититы. Иногда в них наблюдаются неотчетливые реликты структур эффузивных и интрузивных пород.

Алисторский субвулканический пикрит-базальтовый комплекс представлен силлами, штоками,

субпластовыми телами, дайками, приуроченными к зонам повышенной проницаемости – зонам разломов и оперяющих разрывов. Тела представлены метапикродолеритами, метадолеритами, метапикритами, незначительно метаперидотитами, метагаббро. Порода фактически превращены в ортоамфиболиты.

Проявления *левоандриановского* комплекса представлены телами субщелочных габбро, пироксенитов и дунитов.

Дукукский никеленосный габбро-перидотитовый комплекс объединяет ряд интрузий в форме штоков, лополитов, субпластовых тел. Состав простых што-

ков – габбро, габбронориты, кортландиты, горнблендиты, метакортландиты. Сложные интрузии представлены габбро, кортландитами, габброноритами, норитами, кварцевыми диоритами, диоритами. Среди пород явно преобладают габбро. Интрузивные тела, сложенные несколькими разновидностями пород, не являются горизонтально расслоенными, взаимоотношения между дериватами являются сложными, но в большинстве случаев ультрамафитовые рудоносные разности тяготеют к краевым частям массивов. В качестве примера на рис. 1 приведен схематический разрез интрузива Тундровый.

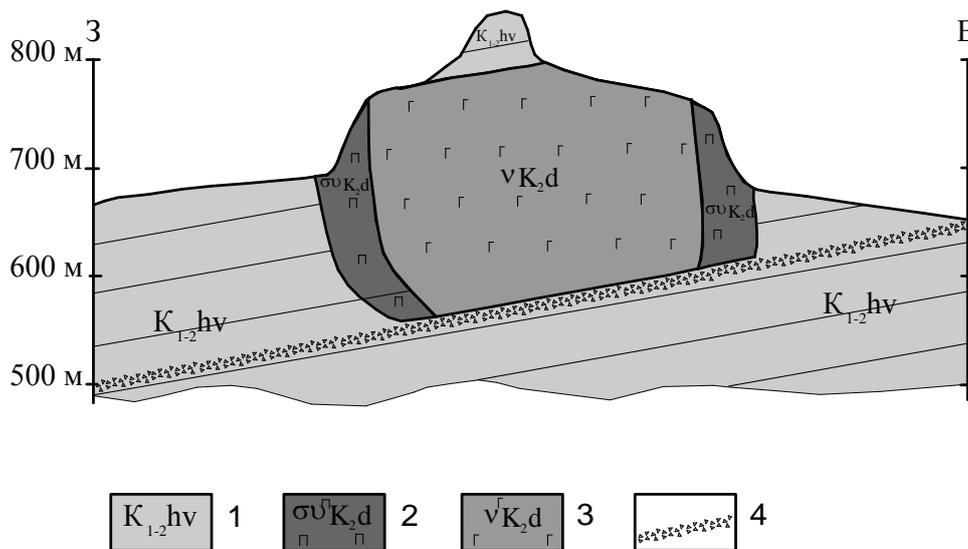


Рис. 1. Схематический разрез рудоносного интрузива Тундровый: 1 – вмещающие сланцы хейванской свиты; 2 – рудоносные метаперидотиты, тальк-хлоритовые породы (дукукский комплекс); 3 – габбро (дукукский комплекс); 4 – зона разлома, рвущего интрузивное тело

В. А. Полетаев (2004) считает, что формирование сульфидного оруденения происходило полигенным и полихронным способом в магматический и метаморфический этапы, однако богатые руды связаны с метаморфическим этапом [12].

Изучая породы месторождения Шануч, О. Б. Селянгин (2003) пришел к следующим выводам:

1. Безрудные и рудоносные базиты представляют серию генетически родственных пород полигенного, метамагматического и собственно магматического происхождения, включающую соответственно две ветви: мафическую и салическую.

2. Ликвационное обособление рудного сульфидного расплава происходило при дифференциации магмы в промежуточном очаге, до отделения ее безрудных фракций.

3. Привнос в кристаллизовавшуюся магму метаморфизирующего флюида снижал вязкость силикатного и сульфидного расплавов, способствуя более полному отделению и концентрации последнего, с поздней-

шими мобилизацией, фильтр-прессингом и интрузивно-протрузивным перемещением с частью материнских пород на верхние уровни общей рудно-магматической системы. Внедрение первично кумулатных рудоносных базитов имело интрузивно-протрузивный характер, при котором рудный сульфидный расплав играл роль смазки и носителя дробившихся блоков материнских и ксенолитов вмещающих пород [10].

Таким образом, более ранними исследованиями уже предполагалась двустадийность магмовыведения никеленосных пород дукукского комплекса и полигенность формирования сульфидного компонента. Однако не все механизмы медно-никелевого рудообразования детально рассмотрены и объяснены. Серпентинизация пород рассматривается в качестве автотемпературного процесса, наличие в магматитах корового вещества объясняется контаминацией коровых компонентов магматическими очагами после их внедрения в верхние уровни коры.

В процессе петрографического изучения пород дукусского комплекса были обнаружены некоторые особенности, которым ранее, возможно, не уделялось должного внимания. Эти особенности информативны в связи с процессами рудообразования и магмовыведения.

Исследования авторов основаны на изучении образцов, отобранных из нескольких массивов дукусского комплекса во время полевых работ 2012 г.

В шлифе из сульфидизированного серпентинита обнаружены разобщенные волокна серпентина в рудной массе (рис. 2, 3), что указывает на подъем уже серпентинизированного вещества и разрушение в процессе подъема серпентинизированных зерен.

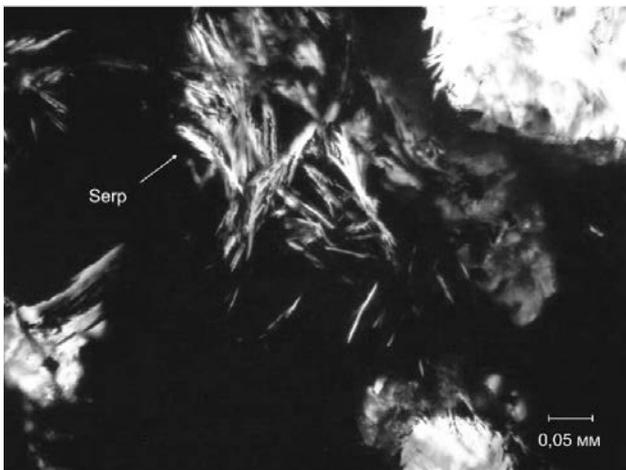


Рис. 2. Волокна серпентина на фоне рудной массы (Serp – серпентин, черное – рудные минералы). Шлиф, николи скрещены

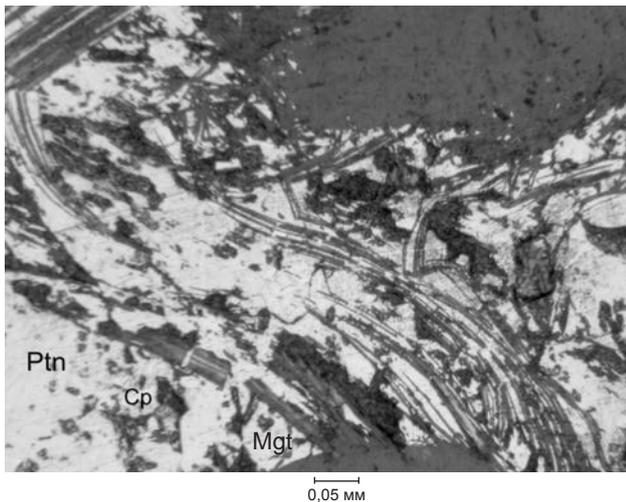
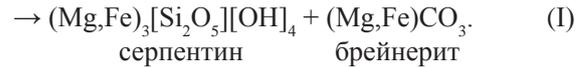
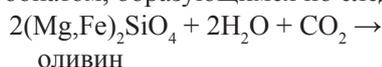


Рис. 3. Волокна серпентина (серое) на фоне рудной массы (Mgt – магнетит, Ptn – пентландит, Cr – халькопирит). Аншлиф

На серпентинизацию оливина в сульфидном расплаве также указывает прорастание рудного вещества карбонатом, образующимся по следующей схеме:



Взаимное прорастание карбоната и сульфидов указывает на рост карбоната во время кристаллизации рудного вещества, что вполне согласуется с температурными диапазонами серпентинизации и кристаллизации пирротина. Серпентинизация протекает при температурах не выше 400 °С [13], пирротин II генерации кристаллизуется в температурном интервале 370–410 °С [14].

На серпентинизацию и амфиболизацию магматического вещества именно в промежуточных очагах указывают ровные контакты приповерхностных интрузий с вмещающими породами. Если бы серпентинизация происходила в современных местоположениях интрузий, наблюдалось бы разлинзование вмещающих сланцев и вдавливание интрузивного вещества в межслоевое пространство, так как при серпентинизации объем пород увеличивается на 20–27 % [13]. При серпентинизации в промежуточном очаге увеличение объема создает избыточное давление, которое усиливается уменьшением удельного веса пород. При серпентинизации дунитов-пироксенитов удельный вес пород снижается до 2,5–2,6 г/см³ [13]. При разогреве промежуточных очагов в первую очередь будет подплавляться рудная фаза, которая имеет самую низкую температуру плавления из всех компонентов системы. Следовательно, избыточным давлением должны отжиматься небольшие порции частично расплавленного вещества, сульфидный расплав в котором играет роль смазки. Такие небольшие интрузивные тела, обогащенные рудным веществом по сравнению с классическими никеленосными ультраосновными массивами наблюдаются в южной части СКМ.

Таким образом, ровные контакты интрузий с вмещающими породами, их обогащение сульфидами, наличие волокон серпентина в рудном веществе указывают на серпентинизацию мафит-ультрамафитовых магм именно в промежуточном очаге, расположенном на более глубоких уровнях коры, и последующий отжим мелких порций обогащенного сульфидами вещества в верхние этажи. Распределение вещества в верхних этажах должно происходить согласно удельному весу отжимающихся порций, т.е. габбро-диоритовые дериваты должны занимать верхние этажи вновь образованных интрузий, а серпентиниты и кортландиты с сульфидами – нижние. Такая ситуация наблюдается в южной части СКМ, где безрудные габбро-диориты обычно подстилаются талькхлоритовой массой с сульфидами. Обогащение нижних этажей интрузий рудным веществом наблюдается и в телах, сложенных одной разновидностью пород.

Непонятным оставался факт наличия частичной ликвации, подтверждающийся редкой вкрапленностью сульфидов во всех дериватах мафит-ультрамафитовых пород дукукского комплекса. Почему не произошло полной ликвации рудного вещества? Для объяснения выявленной особенности пород дукукского комплекса были произведены термохимические расчеты реакции серпентинизации оливина.

Для упрощения расчетов определялась энтальпия реакции серпентинизации форстерита, так как разница в энергии связи кислорода с магнием и железом не столь существенна (360 и 406 кДж/моль соответственно [15]) и характер связей после реакции не изменяется.

Согласно схеме строения (рис. 4), молекула оливина имеет четыре связи кремний-кислород с энергией 464,75 кДж/моль [16; 17] и 4 связи кислород-магний с энергией связи 180 кДж/моль [18]. Энтальпия молекулы оливина составляет $4 \cdot 464,75 + 180 \cdot 4 = 2579$ кДж/моль.

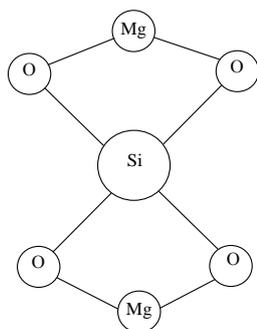


Рис. 4. Схема строения молекулы оливина

Вода имеет суммарную энергию связи атомов водорода с кислородом 926,5 кДж/моль [16; 19; 20]. Суммарная энергия связи кислорода и углерода в молекуле углекислого газа составляет 1608 кДж/моль [12; 17]. Из уравнения реакции (II) видно, что оливин и вода вступают в реакцию в количестве 2 молей, а углекислый газ — 1 моля.



Общая энтальпия вступающих в реакцию веществ составит:

$$2 \cdot 2579 + 2 \cdot 926,5 + 1608 = 8619 \text{ кДж/моль.}$$

При реакции серпентинизации оливина происходит отрыв атомов кислорода от кремне-кислородных тетраэдров и присоединение их к CO_2 и водороду, отрываемому от молекул воды (рис. 5).

При этом в молекуле воды разрывается связь с энергией 498,7 кДж/моль, а остается с энергией 427,8 кДж/моль. При соединении атомов кислорода и водорода возникает также связь с энергией 427,8 кДж/моль [16]. В молекуле CO_2 разрывается двойная кислородно-углеродная связь с энергией

804 кДж/моль, ее заменяют две одинарные кислородно-углеродные связи с энергией 353,25 кДж/моль каждая [17; 21; 22].

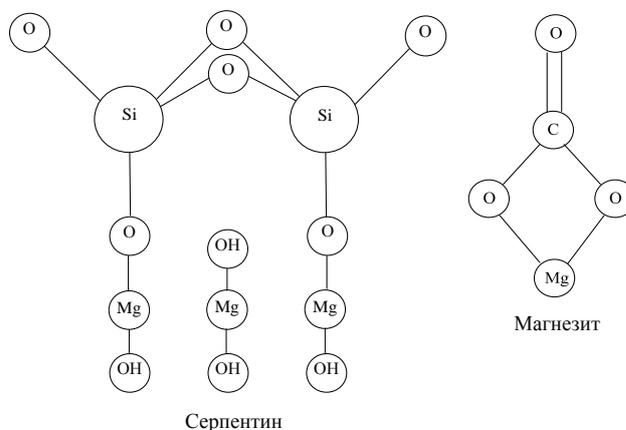


Рис. 5. Схематическое строение молекул серпентина и магнезита

Энергия связи атомов в молекуле серпентина составляет:

$$180 \cdot 6 + 427,8 \cdot 4 + 464,75 \cdot 8 = 6509,2 \text{ кДж/моль.}$$

Энергия связи атомов в молекуле магнезита составляет:

$$804 + 353,25 \cdot 2 + 180 \cdot 2 = 1690,5 \text{ кДж/моль.}$$

Таким образом, общая энтальпия продуктов реакции составит:

$$6509,2 + 1690,5 = 8199,7 \text{ кДж/моль.}$$

Энтальпия реакции является разницей энтальпий продуктов реакции и реагентов и составляет: $8199,7 - 8619 = -419,3$ кДж/моль.

Отрицательный знак энтальпии реакции указывает на то, что реакция экзотермическая, т.е. протекает с выделением теплоты в количестве 419,3 кДж на 1 моль серпентина и магнезита. Выделение такого количества теплоты в случае полной серпентинизации оливина в изолированной системе нагревало бы продукты реакции (при теплоемкости серпентина 379,74 Дж/град·моль [23] и магнезита 88 Дж/град·моль) на $419,3 / (0,37974 + 0,088) = 869$ градусов. Так как серпентинизация протекает при температуре не выше 400 °С, можно сделать вывод, что внедрение промежуточных мафит-ультрамафитовых очагов происходило в холодные вмещающие породы на ранних стадиях развития метаморфического ядра. Далее в процессе серпентинизации происходил постоянный отвод тепла во вмещающие породы, скорость серпентинизации контролировалась замедлением реакции при нагреве до 400 °С и ускорением при охлаждении. Следовательно, серпентинизация ультрамафитов не может быть чисто автометаморфическим процессом, так как экзотермичность реакции серпентинизации выступает в роли ее ингибитора. При нагреве реагирующей массы до 400 °С и замедлении реакции флюидная составля-

ющая должна покидать магматические очаги, а последующая серпентинизация происходит при участии вод материнских пород. Выделяющееся из пород флюидное вещество может переносить рудный компонент в виде растворов и формировать руды гидротермального генезиса.

Таким образом, расчеты указывают на длительное существование магматических очагов при температуре, близкой к 400 °С, вплоть до окончания реакции серпентинизации. Данные выводы подтверждаются взаимным прорастанием карбоната и рудного вещества, установленным при изучении шлифов и аншлифов. Именно на этой стадии развития магматических очагов могло происходить отжатие небольших порций сульфидного расплава (Аннабергитовая щель) и рудоносных серпентинитов. Отсутствие реликтов оливина указывает на полную серпентинизацию магматического вещества в условиях охлаждения. Внедрение талькосодержащих пород происходило позднее, при всеобщем разогреве территории на завершающих стадиях развития метаморфического ядра, так как тальк развивается по серпентину при температуре выше 500 °С. То есть талькосодержащие породы представляют собой продукты изменения серпентинизированных дериватов промежуточных магматических очагов.

Наличие редкой вкрапленности сульфидов во всех дериватах мафит-ультрамафитовых образований (отсутствие полностью безрудных пород) указывает на частичную ликвацию рудного вещества, происходившую, вероятно, в околосолидусных температурных интервалах (для пирротина это 800–370 °С). Полной ликвации, характерной для классических ультраосновных массивов, не произошло по причине быстрого охлаждения промежуточных магматических очагов. Быстрое охлаждение могло происходить под воздействием механизма дегазации внедрявшихся магм, что указывает на наличие значительного количества флюидов в магматическом веществе. Немаловажное значение имеет также снижение температуры плавления обводненных магм до 1200 °С (против 1800 °С сухих). Присутствие во флюидной фазе воды и углекислоты и отсутствие значительной зараженности магматических пород кремнеземом указывает на удаленность магмопродуцирующего субстрата от зоны субдукции и его насыщение продуктами отделения кристаллизационной и конституционной воды и разложения карбонатов (на CO₂ и оксиды) ранее дефлюидизированной плиты.

Таким образом, основной объем частичной ликвации происходил во время серпентинизации промежуточных магматических очагов. При завершении реакции серпентинизации происходило дальнейшее

охлаждение очагов. Отжатие обогащенных сульфидным веществом пород происходило как при серпентинизации, так и на завершающих стадиях образования метаморфического ядра при разогреве территории и частичном плавлении сульфидного компонента.

Проведенные исследования позволяют предложить следующую модель Cu-Ni рудообразования при формировании ультрамафитовых массивов южной части Камчатского полуострова:

1. Насыщение флюидным коровым веществом участков верхней мантии при субдукции океанической плиты под СКМ.

2. Начало образования метаморфического ядра кордильерского типа, внедрение мантийных выделок на промежуточные уровни коры согласно удельному весу пород, образование промежуточных магматических очагов, быстрое их охлаждение при дегазации флюидного компонента.

3. Частичная ликвация сульфидного расплава и продолжительная серпентинизация магматических пород при температурах около 400 °С. Создание избыточных давлений за счет увеличения объема промежуточных очагов при серпентинизации.

4. Разогрев территории, подплавление сульфидного вещества, интрузивно-протрузивное отжатие обогащенного сульфидным компонентом вещества в верхние этажи коры за счет избыточного давления. Остаткование серпентинизированных пород при разогреве выше 500 °С.

Схематически модель изображена на рис. 6.

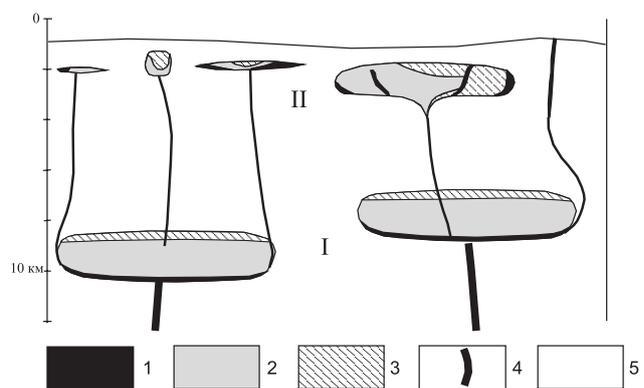


Рис. 6. Схематическое изображение модели формирования интрузивов дукусского комплекса южной Камчатки: 1 – ликвационные сульфидные медно-никелевые руды; 2 – габбро; 3 – диориты; 4 – подводящие каналы; 5 – континентальная кора

ЛИТЕРАТУРА

1. О Становой никеленосой провинции Дальнего Востока / В. А. Степанов [и др.] // ДАН. – 2007. – Т. 417, № 3. – С. 1–3.
2. Медь-никеленозные габброидные формации складчатых областей Сибири / А. П. Кривенко [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 237 с.

3. Лучицкая М. В. Два этапа формирования гранитоидов Срединного хребта Камчатки. Их тектоническая и геодинамическая позиция / М. В. Лучицкая, А. В. Соловьев, Дж. К. Хориган // Геотектоника. – 2008. – № 4. – С. 49–69.
4. Ерёмченко А. В. Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа в пределах Срединно-Камчатского кристаллического массива / А. В. Ерёмченко, А. В. Никитин // Мальшевские чтения : материалы Всерос. науч. конф. : в 2 т. – Т. 2 / Старооскольский филиал ФГБОУ ВПО МГРИ-РГГРУ; ИПК «Кириллица». – Старый Оскол, 2013. – С. 380–383.
5. Селянгин О. Б. Кортландит – амфиболовый пироксенит – горнблендитовая серия расслоенного никеленового интрузива Восточно-Геофизический, Шанучское рудное поле, Камчатка / О. Б. Селянгин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2006. – № 2, вып. 8. – С. 9–29.
6. Селянгин О. Б. Новые данные о строении и эволюции никеленового интрузива Кувалорог. Южная Камчатка / О. Б. Селянгин // Вестник КРАУНЦ. – 2007. – № 1, вып. 9. – С. 111–126.
7. Старков Г. Н. Роговообманковые перидотиты габброидных комплексов и перспектива связанной с ними никелевой минерализации (на примере Южной Камчатки) / Г. Н. Старков // Вопросы геологии, геохимии и металлогении Северо-Западного сектора Тихоокеанского пояса. – Владивосток, 1970. – С. 105–107.
8. Селянгин О. Б. О тектонической позиции никеленовых интрузивов Срединно-Камчатского массива / О. Б. Селянгин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Петропавловск-Камчатский. – 2009. – № 1, вып. 13. – С. 123–138.
9. Щека С. А. Никеленовые кортландиты Камчатки / С. А. Щека, В. М. Чубаров // Изв. АН СССР. Серия геологическая. – 1987. – № 2. – С. 50–61.
10. Селянгин О. Б. Петрология никеленовых базитов Шанучского рудного поля, Камчатка / О. Б. Селянгин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2003. – № 2. – С. 33–55.
11. Шульдинер В. И. Допозднемезозойский фундамент Камчатской складчатой области и тектонические условия его формирования / В. И. Шульдинер, А. И. Ханчук, С. В. Высокский // Очерки тектонического развития Камчатки. – М. : Наука, 1987. – С. 6–53.
12. Полетаев В. А. Камчатская платиноидно-никеленовая зона – геология и рудоносность : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук / В. А. Полетаев. – М., 2004. – 22 с.
13. Печерин В. Н. Минералого-петрографическое исследование серпентинитов и серпентинизации ультрабазитов Полярного Урала : материалы X Междунар. молодежной науч. конф. Севергеоэкотех / В. Н. Печерин. – Ухтинский ГТУ, 2009.
14. Светлицкая Т. В. Определение температур образования сульфидов массивных руд Чайского Cu-Ni месторождения (Северное Прибайкалье) / Т. В. Светлицкая, Е. В. Кислов // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения : материалы III Междунар. конф. – Екатеринбург : Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2009. – Т. 2. – С. 186–189.
15. Время проявления никеленовой норит-кортландитовой формации на востоке Азиатского континента / Э. Г. Конников [и др.] // Геохимия. – 2006. – № 3. – С. 1–7.
16. Рабинович В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – Л. : Химия, 1991. – 432 с.
17. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения : в 2 ч. / А. Вест ; под ред. Ю. Д. Третьякова. – М. : Мир, 1988. – Ч. 1. – 588 с.
18. Молекулярные постоянные неорганических соединений : справочник / К. С. Краснов [и др.]. – Л. : Химия, 1979. – 448 с.
19. Мортимер К. Теплоты реакций и прочность связей / К. Мортимер. – М. : Мир, 1964. – 287 с.
20. Мюнстер А. Химическая термодинамика / А. Мюнстер. – М. : Мир, 1971. – 295 с.
21. Киселева И. А. Термохимия минералов и неорганических материалов / И. А. Киселева, Л. П. Огородова. – М. : Научный мир, 1997. – 256 с.
22. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону / Л. В. Гурвич [и др.]. – М. : Наука, 1974. – 351 с.
23. Хитаров Н. И. Процесс серпентинизации и связанные с ним вопросы / Н. И. Хитаров, В. Я. Леонидов, В. А. Пугин // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. – Л. : Наука, 1967. – С. 194–210.

Воронежский государственный университет

Ерёмченко А. В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии и геодинамики

E-mail: averema@yandex.ru
Тел.: 8-905-052-91-55

Ерёмченко Д. В., преподаватель кафедры общей геологии и геодинамики

E-mail: krilova_dasha@mail.ru
Тел.: 8-920-434-47-48

Жабин В. А., аспирант кафедры общей геологии и геодинамики

E-mail: zhabin.v.a.@gmail.com
Тел.: 8-910-284-66-74

Voronezh State University

Eremenko A. V., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor of the General Geology and Geodynamics Department

E-mail: averema@yandex.ru
Тел.: 8-905-052-91-55

Eremenko D. V., Teacher of the General Geology and Geodynamics Department

E-mail: krilova_dasha@mail.ru
Тел.: 8-920-434-47-48

Zhabin V. A., Post-graduate Student of the General Geology and Geodynamics Department

E-mail: zhabin.v.a.@gmail.com
Тел.: 8-910-284-66-74