

На территории Карелии в раннем протерозое на свекофенском коллизионном этапе мощные блоковые перемещения в фундаменте и складчато-разрывные пластические деформации в породах чехла карельского структурного этажа сопровождались СЗ и СВ сдвиговыми деформациями и интенсивными метасоматозом. Изменения в протерозойских породах в пределах зон разломов имеют региональную зональность. В Онежской структуре метаморфизм и метасоматоз происходил при $T=430\text{--}440^\circ\text{C}$, $P=1.7\text{--}2.1$ кбар (по Т.Н. Билибиной и др., В.С. Полеховскому, Н.В. Леденевой и др.). Щелочные метасоматиты (эйситы) представлены слюдитами (с Ст-V-слюдами) и кварц-карбонатными прожилками с сульфидами, селенидами, Vi-Te-соединениями, интерметаллидами, сам. золотом, серебром.

Для аккреционной стадии развития Свекофенской складчатой области характерен андалузит-силлиманитовый тип метаморфизма с зональностью от зеленосланцевой до амфиболитовой фации в условиях $P=2.5\text{--}4.5$ кбар, $T=450\text{--}650^\circ\text{C}$ в С. Приладожье и до гранулитовой фации с $T=750\text{--}800^\circ\text{C}$, $P=4\text{--}6$ кбар в Раахе-Ладужской зоне. В ЮВ части Раахе-Ладужской зоны (Рантасалминской площади) метаморфизм достигал амфиболитовой фации ($T=645^\circ\text{C}$, $P=3.4$ кбар, по Корсману). В этой зоне внедрились наиболее близкие золотому оруденению массивы тоналитов (1.89–1.88 млрд лет). В shear-зонах дорудные изменения представлены серицитом, хлоритом, эпидотом, кварцем, кальцитом, турмалином ($T=440^\circ\text{C}$, P до 2 кбар). Сульфиды и золото отлагались при снижении T от 400 до 105°C .

Таким образом, shear-зоны – это дислокационные структуры сопряженные с региональными сутурами. Для отложения золота более благоприятны shear-зоны в складчатых областях с эндогенной активностью. На КМ на заключительных этапах деформаций в позднем архее формировались зоны ССВ, субширотных, реже иных направлений, на этапе Свекофенской орогении – СЗ и СВ, как в ССО, так и на КМ. Дорудные метасоматиты shear-зон образуются при более высоких P и T и изофациальны зонам динамометаморфизма, синрудные и жильные ассоциации формируются при снижении P и T и обычно носят наложенный и дискретный характер и тяготеют к фациям не выше амфиболитовой, условиям среднетемпературным – мезотермальным.

Работа выполняется по Программе ФИ ОНЗ РАН № 2 «Эволюция литосферы, металлогенические провинции, эпохи и рудные месторождения: от генетических моделей к прогнозу минеральных ресурсов», проекту «Золоторудные системы в архейских зеленокаменных поясах: геодинамические обстановки, возрасты, минералого-геохимическая типизация».

Особенности формирования сульфидно-никелевых и платиноносных (Ni-PGE) руд в архейских провинциях

Вревский А.Б., Турченко С.И.

Учреждение Российской академии наук Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
г.Санкт-Петербург, e-mail: vrev@peterlink.ru

Наиболее важные факторы геологического контроля формирования массивных магматических Ni-PGE сульфидных руд относятся к составу магм и вмещающих их пород, также как и к их тектоническому положению [1]. Важно то, что массивные магматические сульфидные руды обычно принадлежат к мафит-ультрамафитовым породным ассоциациям, сформированным в обстановках рифтогенеза. Такие обстановки обычно способствуют быстрой доставке мантийных магм в земную кору. В результате рифтовые магмы имеют тенденцию быть менее чувствительными к дифференциации, ассимиляции и потере сульфидов во время прохождения через мантийную литосферу и нижние уровни коры и, таким образом, они могут быть более богатыми металлами при внедрении в верхнюю кору. Континентальные рифты могут также содержать богатые серой осадки, которые служат внешним источником для насыщения серой мантийных магм.

Относительно важным фактором рудоносности является также возраст магматических тел в рифтогенных структурах. Наиболее активным в архее был коматиитовый магматизм, имеющий плюм-тектоническое происхождение и позволяющий наиболее быструю доставку магм к верхнекоревым уровням [2, 3]. С другой стороны, обогащенные серой осадочные породы были идеальными контаминантами для насыщения серой магматических тел, но возможно они были незначительно распространены в раннем архее по сравнению с другими раннедокембрийскими эпохами. Таким образом, возраст мафит-ультрамафитовых изверженных серий и их вмещающих пород может играть важную роль как ведущий фактор в разведочной геологии. Это обстоятельство является важным фактом, определяющим то, что магматические сульфидно-никелевые платиноносные руды преимущественно распространены в позднеархейских коматиитах и коматиитовых базальтах, а также приурочены к древнейшим раннепротерозойским расслоенным интрузиям.

Такими типичными коматиитовыми ассоциациями, вмещающими сульфидные Ni-PGE магматические месторождения, являются ассоциации в позднеархейских (3.0-2.7 млрд. лет) зеленокаменных поясах Зап. Австралии (Камбалда), Зимбабве (Шангани) и Канаде (Абитиби) или ассоциации с коматиитовыми базальтами в Рагланде и габбро-верлитами, серпентинитами пояса Томпсон [1]. В противоположность этому коматииты из раннеархейских (3.6-3.2 млрд. лет) зеленокаменных поясов или их фрагментов, типа пояса Барбертон в Ю.Африке, не несут сульфидно-никелевого и платинового оруденения. Так, например, месторождение Бон Аккорд хотя и относится к коматиит-вмещающим [4] и предельно богато Ni (до 36% NiO), но и исключительно обеднено серой. Причиной отсутствия Ni сульфидных руд в коматиитах Ю. Африки является обедненность их именно серой.

Магматические Ni-PGE сульфидные руды, ассоциирующие с коматиитами, обычно находятся в основании лавовых потоков коматиитов или коматиитовых базальтов. Наиболее популярной является модель рудообразования, формирующегося при магматической ассимиляции серы из осадочного субстрата. Основой этой модели является насыщение серой и сегрегация несмесимого сульфидного расплава в основании коматиитовых лавовых потоков. Коматииты имеют значительно более высокий сульфидно-никелевый потенциал по сравнению с базальтами. Это может быть объяснено более высокой температурой их расплавов (1560^oC) по сравнению с базальтами (1250-1200^oC) [5] и в связи с этим большей способностью к ассимиляции любых несущих серу окружающих пород. Кроме того, коматииты обладают значительно более высоким содержанием Ni по сравнению с базальтами, так что любые сульфиды, которые могут в них образоваться, являются потенциально более никеленосными и соответственно платиноносными. Потоки коматиитовых лав имеют турбулентный характер и таким образом сульфиды, которые локализованы в них, изначально носят форму суспензии перед тем как концентрируются в основании лавовых потоков, силлов или краевых частях даек, представляющих собой подводящие каналы таких потоков. По приведенной модели вполне объяснимо отсутствие руд в областях содержащих богатые серой осадочные породы, но не имеющих коматиитовых лавовых каналов или потоков, или в областях содержащих подобные каналы, но не содержащих пород, которые могли бы быть источником серы.

Мобилизация рудных компонентов, в частности никеля, при генерации магм в мантии определяется составом мантийного источника и соответственно общей концентрации в нем никеля, коэффициентами его распределения между силикатным и сульфидным расплавами, остаточными кристаллическими фазами, а также степенью насыщения силикатных расплавов серой.

Экспериментальные данные по физико-химическому состоянию вещества верхней мантии и модельные построения распределения температуры в архейской литосфере свидетельствуют, что уже на глубинах более 100 км мантийные сульфиды должны находиться в расплавленном состоянии. Очевидно, что при расчетной архейской геотерме, выплавление коматиитовых магм будет происходить при более высоких термодинамических параметрах, чем сульфидов. Кроме того, можно ожидать, что первичные магмы, зарождавшиеся на глубинах меньше 100 км, наименее перспективны для концентрации сульфидного вещества. Для наиболее эффективной экстракции сульфидов из мантийного субстрата необходимо, чтобы плавление сульфидов было близким или одновременным с появлением силикатного расплава. Важное значение в этом процессе имеет соотношение солидусов и ликвидусов сульфидов и мантийного вещества. В наибольшей степени это зависит от состава мантии, общего содержания воды в ней и мольной доли воды во флюиде. Сопоставление положе-

ния солидусов мантийного вещества различного состава и солидуса сульфида свидетельствует, что наименьший разрыв между ними существует при плавлении наиболее магнезиальных и наименее водонасыщенных (<1% H₂O) перидотитов

В общем случае наиболее эффективным способом повышения концентрации никеля в мантийных сульфидно-силикатных расплавах является их генерация из изотопно и геохимически обедненного мантийного перидотита. Возникновение таких мантийных источников для высокомагнетических расплавов происходит в двух наиболее общих случаях. Во-первых, при формировании больших масс корового вещества и комплементарной деплетированной мантии, и, во-вторых - при последовательной генерации базальтов и/или пироксеновых коматиитов, а вслед за этим перидотитовых коматиитов. Существенной геохимической разницы в продуктах плавления таких обедненных мантийных источников не будет наблюдаться, за исключением изотопного состава Nd, который в общем случае отражает различную длительность этих двух схем мантийного петрогенезиса. Поскольку для концентрации расплавленных сульфидов мантийных глобулей путем диффузионной миграции и коалесценции в значительные массы, способных к перемещению, требуется время, то предпочтительным для повышенной концентрации сульфидов в расплавах является плавление первично деплетированного вещества мантии. Для архейских коматиитовых вулканоплутонических комплексов зеленокаменных поясов наиболее эффективным механизмом экстракции рудных компонентов из верхней мантии являлось плавление первично наиболее деплетированного «сухого» вещества мантии (DM) при давлении 10GPa <P> 4GPa. Такой механизм приводит к глубинному разделению и совместному излиянию сульфидных и силикатных расплавов с образованием в кумулятивных частях потоков густо вкрапленных руд [6].

Различия между древнейшими коматиитами и рудоносными коматиитами позднего архея.

I. Сульфидно-никелевые платиноносные руды обычно ассоциируют с позднеархейскими коматиитами интрузивных и вулканических фаций или же с палеопротерозойскими бонинитовыми и габбро-верлитовыми интрузиями, приуроченными к толеит-базальтовым вулканитам палеорифтовых поясов [7]. Позднеархейские (2.85-2.7 млрд. лет) рудоносные коматиит-содержащие провинции представлены зеленокаменными поясами Норсеман-Калгурли, Агню-Вилуна и Форрестайнья в Зап. Австралии; поясами Кидд-Мунро и Тисдейл в провинции Абитиби в Канаде и Рейлянс в кратоне Зимбабве, Ю. Африка. Палеопротерозойские бонинитовые сульфидно-никеленосные и платиноносные расслоенные интрузии с возрастом 2.5-2.35 млрд. лет характеризуют глобальный этап рифтогенеза и распространены в большинстве позднеархейских кратонов. Они представлены платиноносными интрузиями с сульфидно-никелевым оруденением: в Зимбабве - Великая Дайка (2460±16 млн. лет), интрузия Джимберлана и ее аналоги в Западной Австралии (2420±30 млн. лет); на Балтийском щите - линейные пояса интрузий Койлисмаа в Сев. Финляндии (2440±20 млн. лет) и Олангской группы в Сев. Карелии (2,45-2,43 млрд лет); расслоенные интрузии Кольского п-ва - Мончеплутон и Федорово-Панские Тундры (2450-2470 ±30 млн. лет); интрузии комплекса Ист Булл Лейк (2,45 млрд. лет) в провинции Онтарио на Канадском щите. Более поздние события (2.0-1.9 млрд. лет) проявлены во внедрении сульфидно-никеленосных с платиной габбро-верлитов и серпентинитов в толщи базальт-пикритов рифтогенных поясов Томпсон, Фокс-Ривер и Кейп Смит на Канадском щите и Печенгском поясе на Балтийском щите в России.

Значительно более древние коматиит-содержащие зеленокаменные пояса с возрастом 3.6-3.2 млрд. лет, распространенные в Капваалском кратоне в Ю. Африке и кратоне Пилбара в Зап. Австралии не несут сульфидно-никелевого платиноносного оруденения. В разновозрастных поясах Абитиби в раннеархейских коматиитах Канады также отсутствует сульфидно-никелевая минерализация и не проявлены геохимические свидетельства контаминации серу-содержащих пород, в то время как более молодые коматиит-содержащие пояса несут признаки сульфидно-никелевой минерализации и контаминации [8]. Это может поддерживать модель соотношения между возрастом коматиитовых лав и их потенциальной возможностью ассимилировать вмещающие породы и нести сульфидно-никелевое с платиной оруденение.

II. Древнейшие коматииты отчетливо различаются по главным элементам и элементам-примесям от более молодых коматиитов любых докембрийских провинций. Наиболее заметно это в отношении деплетированности древнейших коматиитов (например, пояса Барбертон в Ю. Африке) глинозе-

мом, Ti, V, Sc и HREE [8]. Предполагается, что эти особенности состава связаны с низкими степенями (около 30%) парциального плавления мантии в условиях высокого давления от 7 до 10 гигапаскаль (GPa) [10]. Условия высокого давления мантийных расплавов характеризовали раннеархейскую мантию ранних этапов эволюции Земли. Однако, некоторые зеленокаменные пояса, такие как пояса Абитиби в Канаде, содержат оба типа коматиитов [2] и соответственно можно предположить, что деплетированные глиноземом и не деплетированные коматииты могли быть образованы и вынесены из разных по глубинности частей одного и того же плюма [11]. Древнейшие коматииты были образованы, вероятно, при плавлении метасоматизированной субконтинентальной литосферной мантии.

Коматииты, подобные древнейшим зеленокаменным поясам типа Барбертон в Ю. Африке, имеют гораздо более низкое содержание металлов платиновой группы (МПГ) и низкое Pd/Ir отношение, чем глинозем-недеплетированные коматииты более молодых поясов различных архейских кратонов. Растворимость серы и содержание МПГ в базальт-пикритовых магмах сильно зависит от глубин их выплавления [12, 13]. При 10 GPa и 1810°C пикриты могут растворять до 685 ppm S, а при 14 GPa и 2000°C они могут растворить лишь 386 ppm S. Если эти результаты применить для коматиитов и предположить, что примитивная мантия содержит приблизительно 200 ppm S, то позднеархейские не деплетированные в отношении глинозема коматииты требуют 30% плавления мантии, чтобы поглотить все сульфиды источника, в то время как раннеархейские такие же коматииты требуют 50% парциального плавления.

Как было отмечено, деплетированные по глинозему коматииты, которые были образованы на глубинах с давлением 14 GPa содержат на 50% меньше серы, чем не деплетированные по глинозему коматииты, образующиеся при 10 GPa. Температура излияния деплетированных по глинозему коматиитов на 100°C выше, чем не деплетированных по глинозему коматиитов, что сказывается на более высокой растворимости серы во время излияния первых. Поэтому коматииты деплетированные по глинозему, требуют гораздо большей доли участия в контаминации внешнего дополнительного источника серы для достижения насыщения ею коматиитов и проявлению в них рудоносности.

Раннеархейская кора кратонов Капваал и Пилбара могла быть менее насыщена серой, чем позднеархейская кора кратонов Йилгарн, Зимбабве, Карельского и поясов Абитиби и как результат термальная контаминация коры расплавами на них была более значительной для насыщения серой. Коровые признаки (такие как значения изотопного состава серы) могут быть значительно занижены в магматических системах и такие свидетельства коровой контаминации часто трудны для определения [14]. В случае с раннеархейскими коматиитами возникают дополнительные проблемы, выраженные в том, что их основание часто не обнажено и, таким образом, прямое определение содержания серы в субстрате коматиитовых лав невозможно. Можно также отметить факты низкой активности серы в истории эволюции раннеархейских поясов, указывая на широкое распространение в них железо-окисных фаций (железистых кварцитов). Субстрат коматиитовых потоков мог быть в раннем архее более примитивным чем в позднем архее или раннем протерозое и поэтому был более труден для ассимиляции лавовыми потоками коматиитов. Если позднеархейская кора была более легкой и более эволюционированной чем раннеархейская, то поднимающиеся в промежуточные камеры магмы могли легче ассимилировать вмещающие породы. При формировании древнейших коматиитов кора была более плотной и магмы могли изливаться без внедрения в промежуточные камеры и были поэтому менее контаминированными. В соответствии с этим можно предполагать, что для молодых коматиитов коровая ассимиляция могла быть тем начальным механизмом, который способствовал сегрегации сульфидов в субвулканических камерах. Часть сульфидов могла быть перемещена к поверхности флюидами и отложена в основании коматиитовых потоков.

Многие не деплетированные по глинозему позднеархейские коматииты также могут быть безрудными в отношении платиноносных сульфидно-никелевых руд. Это может быть связано и с провинциальными геохимическими особенностями территорий. Отсутствие сульфидно-никелевых руд в древнейших коматиитовых провинциях может быть, конечно, и случайностью, связанной с незначительной современной распространенностью областей с сохранными раннеархейскими коматиитами, в которых сульфидно-никелевое платиноносное оруденение к тому же, возможно, еще не открыто.

Работа выполнена при поддержке Программы ОНЗ-2 фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН.

Литература

1. *Naldrett, A.J.* Magmatic sulfide deposits. Oxford. U.K. Clarendon press. 1989. 186 p.
2. *Condie, K.C.* Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge. Cambridge University Press. U.K. 2001. 306 p.
3. *Вревский А.Б. и др.* //Петрология. 2003.Т. 11. № 6.С. 587-617.
4. *De Waal, S.A.* In: Mineral deposits of Southern Africa. Geol. Soc. of South Africa. Johannesburg. 1986. P. 287-291.
5. *Arndt N.T., Ginibre C., Albarede F., Cheabille M., Herzberg C., Jenner G., Lahaye Y.* // Geology. 1998. V. 26. P. 739-742.
6. *Вревский А.Б.* //Геология рудных месторождений. 1991, N 1, том 3, с.23-32
7. *Турченко С.И.* Металлогения тектонических структур палеопротерозоя. СПб. Наука. 2007. 175 с.
8. *Sproule R.A., Leshner L.M., Ayer J.A., Thurston P.C., Harzberg C.T.* // Precambrian Research. 2002. V. 115. P. 153-186.
9. *Nesbit R.W., Sun S-S., Purvis A.C.* // Canadian mineralogist. 1979. V. 17. p. 165-186.
10. *Herzberg C.* // Journ. of geophysical research. 1992. V. 97. P. 4521-4540.
11. *Tomilinson K.Y., Hughes D.J., Thurston P.C., Hal R.P.* // Lithos. 1999. V. 46. P. 103-136.
12. *Mavrogenes J.A., O'Neill H. St. C.* // Geochemica et Cosmochimica Acta. 1999. V. 65. P. 1175-1180.
13. *Mungall J.E.* //J. Petrology. 2002. V43.N5. P.749-768.
14. *Strauss H.* //Precambrian Research. 2003. V.126. P.349–361.

**Метаморфический контроль рудных месторождений
(на основе новой карты метаморфизма Карело-Кольского региона)**

Глебовицкий В.А., Бушмин С.А.

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург,
e-mail: vg@vg1404.spb.edu

В 2008 году была завершена работа по составлению новой карты метаморфизма фундамента Восточно-Европейской платформы масштаба 1:1000000 по проекту МПР. Исследования курировались Воронежским университетом (рук. профессор К.А.Савко). Карта метаморфизма Карело-Кольского региона составлена авторами этого сообщения. В основу легенды положена количественно откалиброванная схема минеральных фаций метаморфических пород, специально созданная для работы над картой (Бушмин, Глебовицкий, 2008). В качестве геологической основы была принята последняя карта Фенноскандинавского щита, выполненная в цифровом варианте в том же масштабе международной группой скандинавских геологов.

В связи с работой над картой метаморфизма создавалась и продолжает создаваться база данных по всем видам рудных месторождений и рудопроявлений с особым вниманием к стратегическим видам (золото, платиноиды, уран и др.). Использование ГИС-технологий позволяет уже на стадии составления карты выявлять и анализировать закономерности пространственной и временной связи рудообразования и метаморфизма.

Учитывая существующие в настоящее время геодинамические реконструкции для неархейского и палеопротерозойских периодов эволюции региона, установлены связи термодинамических режимов метаморфизма с процессами субдукции и коллизии типов «островная дуга – край древнего континента» и «континент-континент». На примере Свекофеннского орогена, Лапландского гранулитового пояса и неархейского Беломорского пояса показано, что с островодужными (надсубдукционными) магматическими процессами связано появление положительных термических аномалий, выражающихся в метаморфизме гранулитовой фации умеренных или пониженных давлений. Все или большая часть месторождений и рудопроявлений полиметаллов, золота и других видов минерального сырья располагается на периферии этих термальных структур, в зонах относительно низкотемпературного метаморфизма. Эта хорошо и давно известная закономерность помогает понять механизмы формирования месторождений метаморфогенного типа.