

Литература

1. Архангельская алмазоносная провинция / Под ред. О.А. Богатикова. М.: изд-во МГУ, 2000. 524 с.
2. Гавриленко Б.В., Митрофанов Ф.П., Зозуля Д.Р. и др. Перспективы россыпной алмазоносности Кольского региона // Вестник МГТУ. 2000. Т.3. № 2. С. 235-244.
3. Зозуля Д.Р., Пелтонен П., О'Брайен Х., Лехтонен М. Мантийные фации глубинности высокобарических пироксенов Кольского региона // ДАН. 2009. Т. 424. №4. С. 505-509.
4. Калинин М.М., Арзамасцев А.А., Поляков И.В. Кимберлиты и родственные породы Кольского региона // Петрология. 1993. Т.1. № 2. С. 205-214.
5. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 263 с.
6. Gurney J.J. A correlation between garnets and diamonds // University of WA. 1984. Publ. 8. P. 143-166.
7. Kukkonen I.T., Peltonen P. Xenolith controlled geotherm for the central Fennoscandian Shield: Implications for lithosphere-asthenosphere relations // Tectonophysics. 1999. V. 304. № 4. P. 301-315.
8. Lehtonen M.L., O'Brien H.E., Peltonen P. et al. Layered mantle at the Karelian Craton margin: P-T of mantle xenocrysts and xenoliths from the Kaavi-Kuopio kimberlites, Finland // Lithos. 2004. V. 77. P. 593-608.
9. Peltonen P., Brüggmann G. Origin of layered continental mantle (Karelian craton, Finland): Geochemical and Re-Os isotope constraints // Lithos. 2006. V. 89. P. 405-423.
10. Ryan C.G., Griffin W.L., Pearson N.J. Garnet geotherms: Pressure-temperature data from Cr-pyrope garnet xenocrysts in volcanic rocks // Journal of Geophysical Research. 1996. V. 101. P. 5611-5625.

**Золотоносность архея и протерозоя Фенноскандинавского щита –
проблемы и перспективы**

Ивашенко В.И.

Учреждение Российской академии наук Институт геологии Карельского научного центра РАН,
г. Петрозаводск, e-mail: ivashche@krc.karelia.ru,

Золоторудные месторождения на Фенноскандинавском щите сосредоточены преимущественно в палеопротерозойских и неоархейских зеленокаменных поясах и свекофеннидах, соответствующие рудные объекты в пределах которых в генетическом аспекте практически идентичны. Они относятся к нескольким генетическим типам [3], главными среди которых являются орогенический мезотермальный, порфиновый (intrusion-related), колчеданный (VMS) и эпитеермальный (табл.). Формирование золоторудных месторождений происходило, главным образом, в неоархейскую (2,8-2,5 млрд. лет) и свекофеннскую (1,9-1,8 млрд. лет) металлогенические эпохи.

Месторождения золота *орогенического мезотермального типа* широко распространены в докембрии, размещаясь в аккретированных и коллажированных террейнах и контролируясь зонами сдвиговых дислокаций глубинного заложения [8]. На Фенноскандинавском щите, по времени формирования и кратонизации отдельных его частей подразделяющегося на три домена - архейский, свекофеннский и готский, образование золотого оруденения орогенического типа происходило в коллизионные стадии их развития. Для архейского домена это относится к соответствующим периодам эволюции входящих в его состав Карельской и Кольской гранит-зеленокаменных областей, а также к свекофеннскому этапу развития сформированных в его пределах палеопротерозойских рифтогенных зеленокаменных поясов. Для Свекофеннского домена, являющегося результатом конвергентного взаимодействия новообразованной океанической коры и Карельского кратона, формирование орогенических мезотермальных золоторудных месторождений сопряжено с коллизией по оси Раахе-Ладога и проявлением максимальной интенсивности соответствующего рудогенеза на удалении 50-200 км от нее (р. Шеллеффте, Раахе-Хаапаярви) [3]. Золоторудоконтролирующие сдвиговые структуры установлены также в сланцевом поясе Тампере, провинции Бергслеген, ЮЗ Финляндии и С. Приладожье.

МИНЕРАГЕНИЯ ДОКЕМБРИЯ

Сопоставление главных характеристических признаков золоторудных месторождений неoarхейских и палеопротерозойских зеленокаменных и гранитоидных комплексов Фенноскандинавского щита

Характеристические признаки	Архей	Протерозой
Орогенический мезотермальный тип		
Формационный тип	Золото-сульфидный (Пампало, Валкеасуо, Хатуноя, Педролампи, Рыбозеро, Оленинское)	Золото-арсенидный (Суурикуосикко, Осиконмяки, Пякюля) Золото-сульфидный (Пахтаваара, Юомасуо, Сааттопора) Золото-теллуридный (Райконкоски)
Минеральный тип	Золото-пирит-пирротиновый Золото-пирротин-арсенопиритовый	Золото-арсенопиритовый Золото-пиритовый Золото-халькопиритовый
Формы нахождения и состав золота	Золото сам. Au – 70-100%, Ag – 0-25%, Cu – 0-0,53%, Sb – 0-2,8%, Hg – 0-5%	Invisible gold, Золото сам. Au – 40-100%, Ag – 0-60%, Hg – 0-23%, Se – 0-1,7%, Te-0-5%
Ресурсы/Добыча Au, т	200/1,8	870/130
Порфировый (in intrusion-related) тип		
Формационный тип	Медно-золоторудный (Лобаш-1, Золото-редкометалльный (Ялонвара, Пеллапахк)	Медно-золоторудный (Айтик, Бьеркдал, Копса, Йохинева, Курула)
Минеральный тип	Золото-полисульфидный Золото-пиритовый	Золото-халькопиритовый Золото-арсенопиритовый
Формы нахождения и состав золота	Золото сам. Au – 65-100%, Ag – 0-35%, Cu – 0-0,5%	Золото сам. Au – 40-100%, Ag – 0-55%, Cu – 0-0,9%, Hg – 0-12%
Ресурсы/Добыча Au, т	60/0	270/70
Колчеданный (VMS) тип		
Формационный тип	Золото-сульфидный (С.-Вожминское, Талпус, Няльмозерское)	Золото-сульфидный (Оутокумпу, Пюхясалми, Хавери, Виханти, Фалун, Ренстром)
Минеральный тип	Золото-полисульфидный Золото-халькопирит-пиритовый	Золото-полисульфидный Золото-халькопирит-пирротиновый
Формы нахождения и состав золота	Золото сам.	Золото сам. Электрум.
Ресурсы/Добыча Au, т	5/0	150/90
Эпитермальный тип		
Формационный тип	Золото-кварцевый (Кюльмякангас)	Золото-теллуридный (Кутемаярви, Йарвенпаа) Золото-полисульфидный (Болиден)
Минеральный тип	Золото-пиритовый	Золото-алтаит-пиритовый Золото-арсенопирит-пиритовый
Формы нахождения и состав золота	Золото сам	Золото сам. 94.9% Au, 2.4%, Ag 2.1% Pb; Au-Ag-Hg
Ресурсы/Добыча Au, т	?/0	200/150
Ресурсы/Добыча золота (т) - всего	265/1,8	1490/440

Примечание: с использованием данных [2,6], <http://en.gtk.fi/ExplorationFinland/Commodities/Gold/depositlist.html>, <http://geomaps2.gtk.fi/website/fodd/viewer.html>.

Наиболее значимым и исследованным орогеническим мезотермальным оруденением золота в архее Фенноскандинавского щита являются месторождения района Иломанси (Финляндия) зеленокаменного пояса Ялонвара-Хатту-Гулос, в пределах российской части которого в сходной геологической позиции выявлено (КГЭ, ИГ Кар.НЦ РАН,) несколько перспективных рудопроявлений золота (Соаньоки, Хатуноя, Пролонваара, Юованьйоки и др.). В других архейских зеленокаменных поясах щита по масштабам и изученности выделяются месторождения Рыбозеро (3,28 т Au; 2,18 г/т) и Педролампи (3,4 т Au; 5,9 г/т) в Карельской гранит-зеленокаменной области [3] и Оленинское (28 т Au, 3,1 г/т), Няльм (34,5 т Au, 0,35-3,7 г/т) – в Кольской [1].

Орогеническое мезотермальное золото в протерозое Фенноскандинавского щита представлено серией промышленных месторождений в Лапландском зеленокаменном поясе, среди которых одно из крупнейших в регионе - Суурикуосикко (>110 т; 6,1 г/т) и свекофеннидах (Осиконмяки, Йокисиву, Лайвакангас, Пякюля, Янис).

Промышленное оруденение золота *порфирового типа (intrusion-related)* по числу месторождений проявлено в пределах Фенноскандинавского щита незначительно. Однако по ресурсам и добыче золота в совокупности с комплексным характером руд представляется одним из ведущих геолого-промышленных типов месторождений золота в регионе. В архее это месторождения Лобаш-1 (5,06 т Au, 4,71 г/т), Пеллапах (24 т Au, 0,1 г/т) [2, 6], Ялонвара и, вероятно, Таловейс и Заломаевское. В протерозое – Айттик (120 т Au, 0,2 г/т), Бьеркдал (20 т Au, 2,5 г/т), Копса (14 т Au) и др.

Золотонесущие колчеданные месторождения (VMS тип) по состоянию изученности известны только для протерозоя - Оутокумпу - добыто 28 т Au, Виханти и Пюхясалми - добыто ~30 т Au и др.

Эпитермальный тип золоторудной минерализации в Фенноскандии представлен преимущественно свекофеннскими месторождениями, три из которых разрабатывались (Болиден - 128 т Au, Энасен - 20 т Au, Кутемаярви - >15 т Au). Количество золота, полученного из руд этих месторождений, составляет почти половину от всего объема его добычи в регионе за весь исторический период.

Сопоставление главных характеристических признаков золоторудных месторождений неоархея и палеопротерозоя Фенноскандинавского щита (табл.) показало их сходство и различия. Они в полном объеме сходны по генетическим типам месторождений и частично по минеральным типам оруденения, что, вероятно, свидетельствует о принципиально близкой идентичности геодинамических обстановок и эндогенных режимов их формирования. Отличия, заключающиеся в большем разнообразии минеральных типов оруденения, форм нахождения и состава золота, более широком спектре минералов-спутников золота с невысокими значениями удельной энергии кристаллической решетки и гораздо больших запасах протерозойских золоторудных месторождений Фенноскандинавского щита по сравнению с архейскими, предопределяются, по-видимому, различиями динамики проявления эндогенных процессов, ответственных за РТ-градиентные параметры соответствующих рудных систем в архейский и протерозойский этапы эволюции данного щита. Это нашло свое отражение также в крайне ограниченном распространении в архейских комплексах эпитермального и колчеданного (VMS) золотого оруденения (единичные мелкие проявления), арсенипиритсодержащих минеральных ассоциаций и «invisible gold», мелкомасштабности архейских золото-порфировых месторождений, преимущественно связанных с гранитоидами и крупноразмерности их протерозойских аналогов, образованных, главным образом, в связи с монцититоидами и тоналитами. В совокупности с другими геологическими и геофизическими данными сравнительный анализ золотоносности неоархейских и палеопротерозойских зеленокаменных и гранитоидных комплексов Фенноскандинавского щита показал его металлогеническое своеобразие в распределении запасов золота между археем и протерозоем (табл.). Из всего объема добытого в пределах щита золота (~500 т), на долю архейских месторождений приходится ~ 2 т (м. Пампало, Финляндия). Протерозойские (свекофеннские) месторождения Болиден (добыто 128 т Au, 411 т Ag), Айттик (активные запасы: Au – 140 т; Ag – 2800 т) и Суурикуосикко (>115 т Au) - самые крупные золоторудные объекты Европы.

Соответственно, исходя из этого, главными проблемами золотоносности Фенноскандинавского щита в настоящее время являются невыясненность причин низкого золоторудного потенциала его архейских гранит-зеленокаменных комплексов по сравнению с другими докембрийскими регионами и металлогеническая двусмысленность K-Ar и Rb-Sr датировок метасоматитов золоторудных месторождений в пределах Карельского кратона и Беломорского мобильного пояса.

Первая из проблем, выражающаяся в некоем металлогеническом своеобразии рассматриваемого щита, большинством геологов считается кажущейся и обусловленной лишь слабой его изученностью, в особенности на территории России (Карелия, Кольский полуостров), включающей около 90% площади распространенных в его пределах архейских комплексов. Существуют также и другие

объяснения этому, основывающиеся на сравнительном анализе и выявлении отличий архейских зеленокаменных поясов Фенноскандии от аналогичных, но изобилующих крупными месторождениями золота, образований других древних щитов [3; 4; 7]. В разрешении вопроса о низком золоторудном потенциале архея Фенноскандинавского щита в противовес тому, что это является следствием недостаточной изученности его территории, более вероятным представляется действительность этого, объясняющаяся, по-видимому, неблагоприятными для последующего крупномасштабного рудогенеза геодинамическими факторами эволюции щита в архее [6] и массивной тектоно-термальной проработкой его архейских доменов в свекофеннскую эпоху, обусловившей «разубоживание» и частичное «уничтожение» ранее образованных архейских золоторудных концентраций в зеленокаменных поясах вследствие пространственного несовпадения зон мобилизации, транспортировки и отложения рудного вещества в функционировавших в одних и тех же тектоноструктурах Карельского кратона орогенических мезотермальных рудных системах неорархейского и свекофеннского времени.

Вторая из проблем, связанная с изотопным определением возраста золоторудных объектов орогенического мезотермального типа [5], по совокупности геологических данных относящихся к архейской металлогенической эпохе, проистекает из первой и обусловлена, вероятно, свекофеннскими гидротермально-метасоматическими процессами, накладывающимися на золотоносные метасоматиты архейского возраста. Изохронная модель Rb/Sr датирования, реализуемая на этих объектах [5], должна обеспечиваться серией образовавшихся одновременно когенетических минералов (минеральных парагенезисов), имеющих идентичный изотопный состав обычного стронция и варьирующие Rb/Sr отношения, создающие реальный наклон изохроны. Однако прямая на изохронной диаграмме может быть и результатом смешения компонентов (архейских и протерозойских) с различными Rb/Sr отношениями и изотопным составом стронция и являться в таком случае ложной изохроной [1], фиксирующей возраст, не имеющий реального геологического смысла. Последнее для ряда золоторудных объектов (Таловейс, Педроламп, Центральное и др.) и отмечается. Вычисленный для них возраст ~1730 млн лет [5], не коррелируется ни с каким реальным геологическим событием на Фенноскандинавском щите, а для рудопроявления Хатуноя представляется парадоксальным, так как по сути для одних и тех же штучных проб другим методом (Re/Os по молибдениту, ун-т шт. Колорадо, США) возраст определен как архейский - 2772 ± 11 - 2773 ± 11 млн. лет.

Широкое распространение в пределах архейских зеленокаменных поясов Карельского кратона на метасоматитов, испытавших свекофеннские преобразования или новообразованных в этот период (~1,9-1,8 млрд. лет) с РТ параметрами, благоприятными для локализации золотого оруденения орогенического мезотермального типа, свидетельствует о том, что изофациальные архейские метасоматиты в них существенно эродированы, а сохранившиеся - подверглись интенсивной термальной и флюидной проработке, обусловившей в той или иной степени вынос из них ряда рудных компонентов, в т.ч. и золота. При формировании свекофеннских метасоматитов по архейскому субстрату растворы, проходя сквозь породы базовых золоторудных формаций (черносланцевой, колчеданной, джеспилитовой, порфировой), из которых еще в архейское время были экстрагированы золото и сопутствующие рудные элементы, не обогащались ими и соответственно не могли приводить к формированию значительных концентраций золота.

Основываясь на изложенном и изотопном датировании рудоносных метасоматитов AR зеленокаменных поясов Карельского кратона, в большинстве своем показывающем их свекофеннский (или более молодой) возраст, перспективы его на золото представляются невысокими. Потенциально промышленно золотоносными могут быть только архейские зеленокаменные структуры, не подвергшиеся существенной эрозии и свекофеннской тектоно-термальной активизации. Металлогенический потенциал золотого оруденения щита в целом и Карелии в частности, в том числе и на крупные золоторудные месторождения, по аналогии с территориями Финляндии и Швеции связывается с протерозойскими структурами и Свекофеннской эпохой рудообразования. Тем более, что ряд установленных на зарубежной части щита протерозойских золоторудоконтролирующих структур (Раахе-Ладожская, Лапландский зеленокаменный пояс и др.) прослеживается на ее территорию.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 14.

Литература

1. Андреев В.Л. Графические методы в Rb-Sr геохронологии // Проблемы геологии и минералогии. Сыктывкар: Геопринт. 2006. С. 315-328.
2. Гавриленко Б.В. Минерогения благородных металлов и алмазов северо-восточной части Балтийского щита. Докт. диссер. Апатиты. 2003. 399 с.
3. Иващенко В.И. Золото Фенноскандии – металлогения и перспективы золотоносности территории Карелии // Тр. Кар.НЦ РАН. 2006. вып. 9. С. 84-111.
4. Кожевников В.Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск. Карельский научный центр РАН. 2000. 223 с.
5. Ларионова Ю.О. Изотопная геохимия и геохронология золоторудной минерализации в архейских и палеопротерозойских комплексах Карелии. Автореферат канд. диссер. Москва. 2008. 29 с.
6. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. кн.1. под. ред. В.П.Михайлова и В.Н.Аминова. Петрозаводск. Карелия. 2005. 278 с.
7. Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В. и др. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. т. 1. Глобальные закономерности размещения. М. ИГЕМ РАН. 2006. 390 с.
8. Groves D.I., Goldfarb R.J., Robert F. and Hart C.J.R. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance // Economic Geology. 2003. Vol. 98. pp. 1-29.

Разработка глубинных моделей рудных районов, расположенных на древних щитах: от поверхностных структур к разделу кора - мантия

Казанский В.И.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
г. Москва, e-mail: kazansky@igem.ru

Проблема соотношений рудных месторождений с глубинными неоднородностями литосферы занимает одно из важных мест в области геологии, геофизики и геохимии. Она разрабатывается в масштабе металлогенических провинций, металлогенических зон, рудных районов и в разных направлениях. Одно из направлений – создание интегральных глубинных моделей рудных районов, расположенных на древних щитах, на основе корреляции геологических и геофизических данных. Эти модели ориентированы на выявление локальных (среднемасштабных) неоднородностей коры и раздела кора-мантия и установление связи с этими неоднородностями рудоносных поверхностных структур. Излагаемый подход развит на примере Печенгского рудного района на Фенноскандинавском щите и апробирован в Кировоградском рудном районе на Украинском щите. Первый содержит крупные магматические Cu-Ni месторождения, второй – крупные метасоматические урановые месторождения.

Печенгский рудный район представляет собой изолированный сегмент палеопротерозойского рифтогенного пояса с особым набором тектонических структур, ассоциаций горных пород и рудных месторождений (Cu, Ni, Pt, U). Исследования его глубинного строения развивались в два этапа с построением 3D моделей до 15 и 40 км ниже уровня дневной поверхности [1]. На первом этапе была осуществлена корреляция разреза Кольской сверхглубокой скважины и поверхностных структур по составу, возрасту, деформациям и петрофизическим параметрам пород. Было расшифровано поведение на глубину палеопротерозойского (2.3-1.8 млрд. лет) осадочно-вулканогенного комплекса и приуроченных к нему Cu-Ni месторождений и высказано предположение, что современный эрозионный срез Печенгского рудного района представляет собой горизонтальное сечение мантийной рудообразующей системы. Ее коровые части были изучены на втором этапе работ с помощью сейсмотомографического моделирования земной коры на всю ее мощность, включая раздел Мохо. В результате под Печенгской структурой, в которой сосредоточены Cu-Ni месторождения, был выявлен локальный подъем раздела М на отметки 36-34 км, интерпретированной как реликтовый мантийный плюм, и над ним обнаружены признаки некогда существовавших промежуточных магматических камер.