

4. Кожевников В.Н., Бережная Н.Г., Пресняков С.Л., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Сергеев С.А. Геохронология циркона (SHRIMP-II) из архейских стратотектонических ассоциаций в зеленокаменных поясах Карельского кратона: роль в стратиграфических и геодинамических реконструкциях // Стратиграфия. Геологическая корреляция. т. 14, № 3, 2006. С. 19–41.
5. Кожевников В.Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск, Карельский НЦ РАН, 2000, 223 с.
6. Светов С.А. Эволюция магматических систем в зоне перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 2005. 210 с.
7. Feng R., Fan J., Kerrich R. 1993. Noble metal abundances and characteristics of six granite magma series overprinting of mesothermal gold deposits // *Econ. Geol.*, V. 88, № 6, P. 1376–1401.
8. Corfu F. 1993. The evolution of the Southern Abitibi greenstone belt light of precise U-Pb geochronology // *Econ. Geol.*, V. 88, № 6, P.1323–1340.
9. Archibald N. 1998. 3D Geology and Tectonic Synthesis of the Kalgoorlie Terrane // *Geodynamics & gold exploration in the Yilgarn. Workshop. abstr.*, 6 August 1998, Perth, Australia, p. 17–22.
10. Кожевников В.Н. Архейские геодинамические системы: полая субдукция, цикличность, молодые аналоги, металлогенические следствия // Сб.: Важнейшие достижения Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Карельский НЦ РАН, 2003. С. 3–21.
11. Nelson E.P., Forsythe R.D. 1989. Ridge collision at convergent margins: implications for Archean and post-Archean crustal growth. *Tectonophysics*, v. 161. P. 307-315.
12. Sillitoe R.H. 1991. *Gold metallogeny of Chile – An Introduction* // *Econ. Geol.*, v.86, P. 1187-1205.13. Shchipansky A.A., Samsonov A.V., Bogina M.M. и др. High-Mg, low-Ti quartz amphibolites of the Khizovaara greenstone belt, Northern Karelia: Archean metamorphosed boninites? // *Doklady Earth Science* 1999. 365a, С. 817–820.
14. Samsonov A.V., Bogina M.M., Bibikova E.V. et al. The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: implications for the tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield // *Lithos*, 2005. V. 79. № 1-2. P. 83–106
15. Светов С.А., Хухма Х., Светова А.И., Назарова Т.Н. Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита // Доклады РАН, 2004, т.397, № 6, С. 810–814.
16. Кожевников В.Н., Сергеев С.А., Сыстра Ю.И. и др. Цирконы из терригенных метаосадков как индикаторы древних рудогенных систем: возрасты, геохимия, минеральные включения // *Наст. сб.* С.
17. Иващенко В.И., Лавров О.Б. Комплексное порфиоровое месторождение Ялонваара в архее Карелии (Россия) // *Геология рудных месторождений*, 1996, т. 38, № 5. С. 412–423.
18. Ross A.A., M.E. Barley, Browne S.J.A. et. al. Young porphyries, old zircons: new constraints on the timing of deformation and gold mineralisation in the Eastern Goldfields from SHRIMP U–Pb zircon dating at the Kanowna Belle Gold Mine, Western Australia // *Precambrian Research* 128, 2004. P. 105–142.

Термальная история архейской мантии – к оценке перспектив алмазности кратонов

Кожевников В.Н.

Институт геологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, e-mail: kvn04@sampo.ru

В докладе приводятся результаты анализа глобальной и региональной позиции кимберлитовых и алмазных провинций и раннедокембрийских регионов, в зеленокаменных поясах которых есть продукты коматиитового вулканизма и сингенетичные медно-никелевые руды, связанные с коматиитами, известные как руды камбалдинского типа. Интерес к системе «кимберлиты – алмазы – коматииты – руды камбалдинского типа» вызван несколькими причинами.

Во-первых, все компоненты этой системы являются результатом мантийного магматизма, происходившего в подавляющем большинстве в кратонах с архейской корой, либо в доменах, претерпевших более позднюю протерозойскую тектоно – термальную переработку, но сохраняющих геохимические и/или изотопно-геохимические признаки существования коры этого возраста [1]. На сегодняшний день обсуждение проблемы происхождения алмазов в значительной мере связано с изучением режимов глубинного магмогенеза и строения «холодных» корней или килей архейских кратонов, уходящих глубоко в мантию [2].

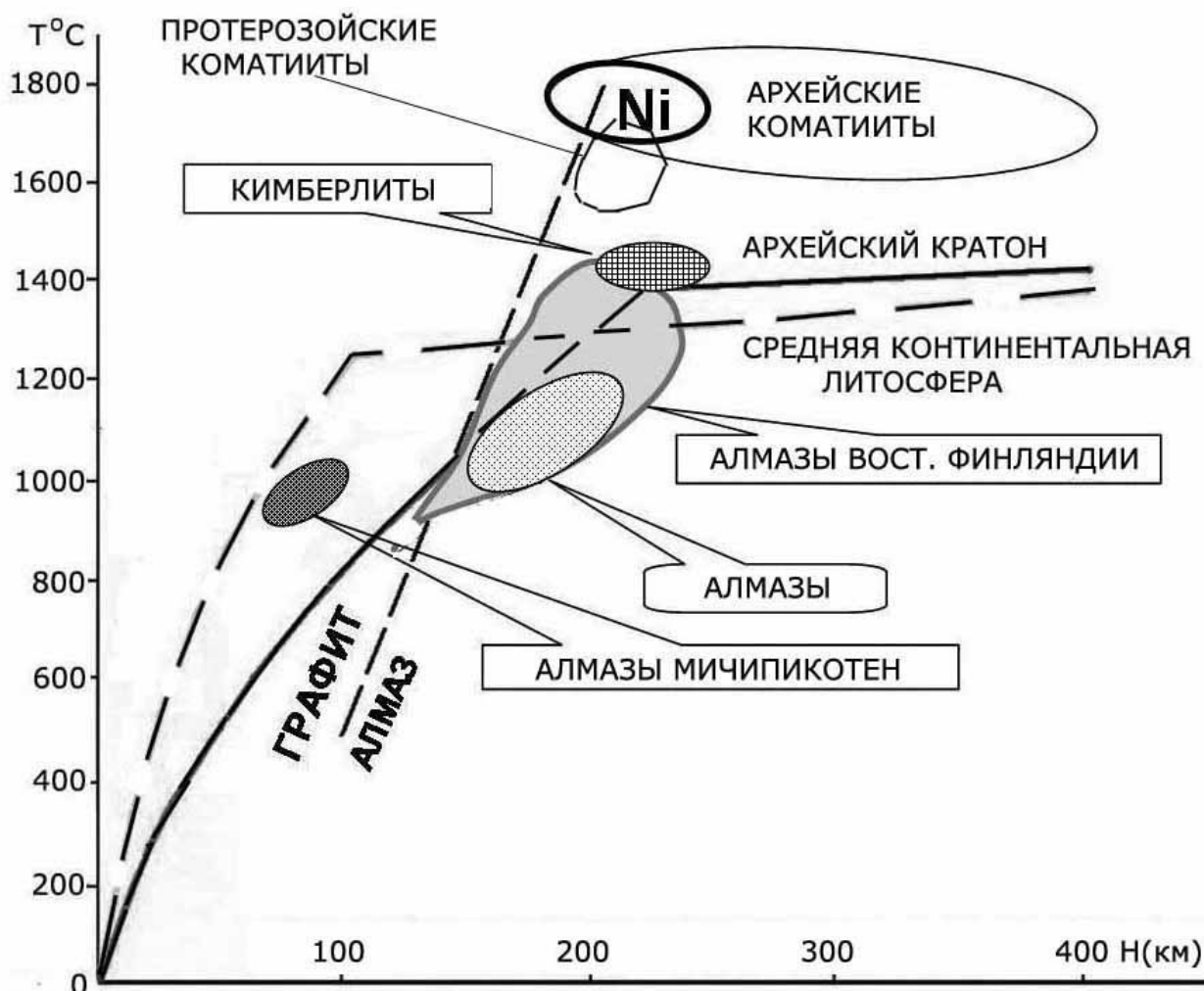


Рис. Температура и глубина выплавки кимберлитов и лампрофиров [10], архейских и протерозойских коматиитов (Ni- камбалдинского типа) [3], условия формирования алмазов архейского возраста по включенным в них сингенетичным силикатам [10], алмазов в ксенолитах эклогитов из кимберлитов Восточной Финляндии [17] и в архейских известково-щелочных лампрофирах пояса Мичипикотен [13]. Архейская и современная «средняя» геотермы [18], граница перехода алмаз → графит [19]

Во-вторых, обобщение данных по палеотемпературам мантии в очагах генерации коматиитовых расплавов, рассчитанном для временного интервала 3.8-1.8 Ga, позволило выявить некоторую специфику Карельского кратона, отличающую его от большинства аналогичных тектонических структур. Так, удалось показать [3], что пик потенциальной температуры ($T_p = 1845^\circ\text{C}$) в архейской мантии Карельского кратона, рассчитанный по составам коматиитов в зеленокаменных поясах, на 300 Ma опередил глобальный пик, зафиксированный на рубеже 2.7 Ga, когда была сформирована наиболее молодая генерация зеленокаменных поясов в кратонах Йилгарн, Сьюпириор, Зимбабве и Сан-Франциско. Именно в этих поясах известны предельно высокотемпературные коматииты, выплавленные из очагов, в которых температура на $270\text{--}350^\circ\text{C}$ превышала среднюю потенциальную температуру мантии ($T_p = 1525^\circ\text{C}$), рассчитанную для рубежа 2.7Ga, и с этими коматиитами связаны руды камбалдинского типа. Специфика никеленосных коматиитов кроме предельно высокой магнетиальности определяется недеплетированностью их глиноземом, что является признаком малоглубинного плавления, и контаминированностью их расплавов материалом континентальной коры. Эти два условия могли реализовываться при взаимодействии мантийного плюма с зоной субдукции на активной окраине континента [4]. В архее Карельского кратона коматииты такого типа проявлены в очень незначительном объеме (формация Пампало в поясе Хатту в В.Финляндии и силлы и

дайки в Костомукше и в Северной Карелии). Для него типичными являются коматииты в мафических аллохтонах фрагментов океанических плато [5] или сложнопостроенных разрезов супрасубдукционных офиолитоидов [6,7].

В третьих, уже при обсуждении проблем никеленосности архейских зеленокаменных поясов был затронут вопрос об алмазах, поскольку к концу прошлого века проявился особый интерес к термальной истории мантии, подогреваемый тем, что в молодых кимберлитах разных регионов Земли были обнаружены алмазы архейского (до 3.4 Ga) возраста [8,9]. Термобарометрия сосуществующих в них силикатов-узников свидетельствует о небольших (140-210 км) глубинах и температурах (900-1200°C) кристаллизации всей ассоциации [10].

В глобальном распределении никеленосных и алмазоносных провинций явно просматривается антагонизм, проявленный в том, что они либо находятся в разных кратонах, либо в разных частях крупных кратонов типа Сьюпириор или Калахари. Возможно это связано со спецификой коматиитового магматизма камбалдинского типа, который в наиболее мощном виде проявлен в локатипическом регионе – Восточном Голдфилде, на востоке кратона Йилгарн и менее интенсивно в кратонах Зимбабве, Сьюпириор и Сан-Франциско. В остальных кратонах сколько-нибудь значительных проявлений руд, связанных с коматиитами, не известно и, таким образом, продуктивный коматиитовый магматизм в глобальном масштабе оказывается достаточно локализованным.

Наиболее контрастно антагонизм в распределении никеленосных и алмазоносных провинций виден на примере кратонов Слэйв, Танзанийский и Йилгарн. В архейской истории двух первых проявления коматиитового магматизма не известны вообще. Одновременно для них характерно широкое проявление кимберлитов, лампроитов и лампрофиров при высоком проценте алмазоносных пород [11,12]. Полярную позицию занимают Йилгарн и Зимбабве, а также восточная часть кратона Сьюпириор – пояс Абитибиде, где в архейских зеленокаменных комплексах значительный объем рудоносных коматиитов. Во всех этих регионах есть проявления кимберлитов, но все они практически не алмазоносные. Обнаруженные в последние годы в поясе Абитибиде проявления алмазов связаны с дайками известково-щелочных лампрофиров, минетт и других пород, сходных с теми, которые описаны в зеленокаменном поясе Мичипикотен в центральной части кратона Сьюпириор. Возраст этих пород 2.67-2.71 Ga, и они представляют совершенно новый тип алмазоносных комплексов, возникших в результате малоглубинного ($H < 80-100$ км) плавления в активной архейской субдукционной зоне, в качестве аналога которой рассматривается зона субдукции в Западной Мексике [13].

В кратоне Каапвааль широко проявлен кимберлитовый магматизм, который был растянут во времени почти на 2 Ga. Для него характерен высокий процент алмазоносных объектов. В этом кратоне коматиитовый магматизм датируется возрастами 3.5 Ga (пояс Барбертон) и 2715 Ma (бассейн Витватерсранд). Несмотря на молодой архейский возраст последнего, никелевое оруденение в нем не обнаружено. Некоторые моменты, связанные с алмазоносностью этого кратона, важны при сопоставлении с территорией Карелии:

- кимберлитовые поля в большей мере развиты в позднеархейской западной части кратона Каапвааль, где коматиитовый вулканизм проявлен слабо;

- в его раннеархейской восточной части большие объемы коматиитов изливались в океанической обстановке и представляют аллохтоны (карельские коматииты в подавляющем своем большинстве также имеют энсиматическую природу и находятся в разрезах океанических аллохтонов);

- заметная часть кимберлитовых полей находится в пределах мобильных поясов (Лимпопо, Магонди, Намаква-Наталь), сформированных в возрастном интервале 2.7-0.95 Ga и наложенных на кратон (с поясами Лимпопо и Магонди по возрасту и природе сходны Беломорский подвижный пояс и северная часть Приладожья, которые нельзя считать заведомо бесперспективными территориями на основании того, что это является «нарушением» правила Клиффорда).

При обсуждении проблемы алмазоносности кратонов значение приобретают следующие различия режимов коматиитового магматизма, существовавшие в архее, которые на эмпирическом уровне вытекают из сравнительного анализа:

- в кратоне Каапвааль, отличающемся обилием алмазоносных объектов, молодые контаминированные коматииты изливались в осадочном бассейне Витватерсранд в обстановке стабилизированной континентальной платформы с очень мощной к тому времени субконтинентальной литосферной мантией [14,15]. Важно, что в позднеархейских осадках Витватерсранда присутствуют детритовые алмазы (!)- прямое доказательство существования алмазов архейского возраста [16];

- в кратоне Йилгарн, представляющем классический регион с никеленосными зеленокаменными поясами, предельно высокотемпературные контаминированные кислой корой и малоглубинные коматииты изливались в обстановке задугового континентального спрединга, которому подвергалась тонкая архейская кора [4]. Подобные условия могли быть обеспечены высоким подъемом плюма на окраине континента.

Открытие среди сингенетичных включений в алмазах из Бразилии, Южной Африки и Канады минеральных фаз, возникающих при экстремально высоких давлениях и глубинах (до 400 км), т.е. значительно глубже очагов генерации кимберлитовых магм, свидетельствует о возможной асинхронности формирования и непарагенетичности этих магм и алмазов. Многочисленные свидетельства того, что алмазы значительно древнее, чем вмещающие их породы, заставляют предполагать, что для того, чтобы древние алмазы сохранились до того, как они попадут в кимберлитовый расплав, который доставит их на поверхность, длительное время должна сохраняться стабильная обстановка. Именно этому условию отвечают древние кратоны.

Антагонизм в распределении алмазоносных и никеленосных провинций находит объяснение при оценке глубинных режимов генерации коматиитов, расплавов щелочных пород и стабильности алмаза. На диаграмме «Температура – Глубина» (см.рис.) линия перехода «алмаз → графит» в высокотемпературной ($T=1700-1830^{\circ}\text{C}$) области пересекает наименее глубинную ($H=180-240$ км) часть поля генерации архейских коматиитовых расплавов, т.е. именно ту область, где выплавлялись коматииты камбалдинского типа. Поэтому эта область является в лучшем случае областью метастабильности алмаза. Учитывая очень крутой на данном графике наклон пограничной линии «графит-алмаз», следует признать, что высокий подъем изотерм, связанный с внедрением плюма, генерирующего никеленосные коматиитовые расплавы, мог быть губительным для ранее выкристаллизовавшихся на том же уровне субконтинентальной мантии алмазов, которые в такой ситуации переходили в графит. Более низкие температуры ($T_p=1450-1730^{\circ}\text{C}$) генерации палеопротерозойских коматиитовых расплавов, в том числе тех, с которыми связаны Cu-Ni-($\pm$ PGE) месторождения (Печенга в В.Фенноскандии, в Канаде это пояса Кейп Смит в орогене Унгава и Томпсон в кратоне Сьюпириор), и сходные с архейскими рудоносными коматиитами по глубинам выплавления ($H=190-225$ км) условия определяют положение этих пород в поле стабильности алмаза. Снижение к рубежу 2 Ga средней температуры в мантии до 1450°C могло обеспечить сохранность алмазов в сублитосферной мантии в архейских регионах, претерпевших протерозойскую тектоно-термальную переработку. Возможно именно поэтому в протерозойских и более молодых орогенических поясах, обрамляющих архейские кратоны, находятся алмазоносные объекты, некоторые из которых являются уникальными по масштабам, например, австралийское месторождение Аргайл, находящееся в орогене Холлс Крик на западе кратона Кимберли. Загадочными остаются условия сохранения в породах пояса Мичипикотен алмазов, кристаллизовавшихся на малых ($H<80$ км) глубинах в поле стабильности графита.

Оценивая перспективы Карелии на алмазы, необходимо подчеркнуть, что уже сделанное на ее и на финской территории (в архейском домене) открытие кимберлитов и лампроитов, в том числе алмазоносных, причем разного возраста, позволяет давать оптимистичный прогноз. Как показывают примеры по динамике открытия алмазоносных объектов в Канаде и Австралии, это очень быстро развивающийся процесс. Отсутствие в регионе признаков коматиитового вулканизма камбалдинского типа с возрастом 2.7 Ga является положительным фактором, который мог обусловить сохранение архейских алмазов в мантии. Признаки проявления в архее региона субдукционных процессов в обстановке активной континентальной окраины, процессов, связанных со взаимодействием плюмов и зон субдукции и коллизионных процессов позднеархейского и палеопротерозойского воз-

раста также могли выступать как благоприятные факторы для неоднократного роста алмазов. При этом могли создаваться предпосылки для образования алмазов как в традиционных породах – кимберлитах и лампроитах, так и в породах – производных субдукционного плавления в позднем архее, как это имеет место в Абитиби и Ваве или в базальтовых и пироксенитовых коматиитах, аналогичных тем, которые описаны во Французской Гайяне в Южной Америке. Кроме того, нельзя рассматривать как бесперспективные территории Беломорского подвижного пояса и Северного Приладожья, о чем свидетельствует опыт изучения алмазоносных объектов в мобильных поясах других докембрийских регионов.

Литература

1. Downes P.J., Griffin B.J., Griffin W.L. Mineral chemistry and zircon geochronology of xenocrysts and altered mantle and crustal xenoliths from the Aries micaceous kimberlite: Constraints on the composition and age of the central Kimberley Craton, Western Australia // *Lithos* 93, 2007. P. 175–198.
2. Глебовицкий В.А., Никитина Л.П., Овчинников Н.О., Пушкарёв Ю.Д., Пестриков А.А., Бабушкина М.С. Верхняя мантия под архейскими кратонами: термальное состояние, химический состав, степень плавления (данные по глубинным ксенолитам) // Тр. V Международного семинара "Проблемы источников глубинного магматизма и плюмы", 2005, Иркутск –Петропавловск-Камчатский. С. 80–97.
3. Кожеевников В.Н., Светов С.А. Мантийные и коровые термальные аномалии в архее и раннем протерозое: региональный анализ, глобальные корреляции, металлогенические следствия // Сб. Геология и полезные ископаемые Карелии, вып.4, Петрозаводск, 2001. С. 3–17.
4. Nelson D.R. Granite–greenstone crust formation on the Archaean Earth: a consequence of two superimposed processes // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 158, 1998. P. 109–119.
5. Puchtel L.S., Hofmann A.W., Mezger K. et al. Oceanic plateau model continental crustal growth in the Archaean: A case study from Kostomuksha greenstone belt, NW Baltic Shield // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998. 155. P. 57–74.
6. Кожеевников В. Н. Геология и геохимия архейских северокарельских зеленокаменных структур. Петрозаводск, 1992, 199 с.
7. Shchipansky A.A., Samsonov A.V., Bogina M.M., Slabunov A.I., Bibikova E.V. 2.8 Ga suprasubduction zone ophiolites of the Khizovaara greenstone belt, North Karelia: the first known occurrence of Archaean rocks having boninitic affinities // *Abstr. SVEKALAPKO Europrobe project, Workshop*, P. 58.
8. Richardson S. H., Gurney J. J., Erlank A. J., and Harris J. W. Origin of diamonds in old enriched mantle // *Nature*, 310, 1984, P. 198–202.
9. Richardson S.H., Harris J.W., Gurney J.J. Three generations of diamonds from old continental mantle // *Nature* 366, 1993. P. 256–258.
10. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира. М., Геоинформмарк, 2000, 271с.
11. Borg G, Shackleton R.M. The Tanzania and NE-Zaire Cratons // In: *Greenstone Belts. Oxford Monographs on Geol. and Geophys.* № 35, Oxford, 1997. P. 608–619.
12. King J., Helmstaedt H. The Slave province, North-West Territories // In: *Greenstone Belts, Oxford Monographs on Geol. and Geophys.*, 35. P. 233–254.
13. Lefebvre N., Kopylova M., Kivi K. Archean calc-alkaline lamprophyres of Wawa, Ontario, Canada: Unconventional diamondiferous volcanoclastic rocks // *Prec. Res.* 138, 2005. P. 57–87.
14. Pearson, D.G., Shirey, S.B., Harris, J.W. and Carlson, R.W. Sulphide inclusions in diamonds from the Koffiefontein kimberlite, S. Africa: constraints on diamond ages and mantle Re-Os systematics // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 160, 1998. P. 311–326.
15. Pearson, D.G., Shirey, S.B., Bulanova, G. P., Carlson, R.W. and Milledge, H.J. Re-Os isotopic measurements of single sulfide inclusions in a Siberian diamond and its nitrogen aggregation systematics // *Geochim. et Cosmochim. Acta* 63, 1999. P. 703–711.
16. Brandl G., M.J. de Wit. The Kaapvaal Craton // In: *Greenstone Belts, Oxford Monographs on Geol. and Geophys.* № 35. Oxford, 1997. P. 581–607.
17. Lehtonen M, O'Brien H, Peltonen P, Johanson B and Pakkanen L. Layered mantle at the edge of the Karelian craton: P-T of mantle xenocrysts and xenoliths from eastern Finland kimberlites // 8th International Kimberlite Conference, 2003.
18. Pollack H.N. Thermal characteristics of the archaean // *Greenstone Belts (Eds.: M.J. de Wit, L.D.Ashwal)*, Oxford monographs on geology and geophysics; no.35, 1997. P. 223–232.
19. Kennedy C.S., Kennedy G.C. The equilibrium boundary between graphite and diamond // *J. Geophys. Res.* 81, 1976. P. 2467–2470.