

# КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РЕШЕНИИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ГЕОЛОГИИ

*В. Н. Кожевников*

Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск; [kvn04@sampo.ru](mailto:kvn04@sampo.ru)

**Введение.** В настоящее время в геологических науках существует широкое многообразие конкурирующих теорий и гипотез, предлагаемых для объяснения природных процессов и явлений самого разного масштаба, с которыми ученые сталкиваются в своих исследованиях. Чтобы получить наиболее полную, объективную и непротиворечивую картину строения, происхождения и эволюции сложных природных систем, каждый исследователь использует самые разнообразные методы полевого и лабораторного изучения минерального вещества, его относительного и изотопного возраста, слагаемых им структур и т. д. Необходимость такого комплексного подхода определяется тем, что каждый из методов обладает собственными «областью компетенции» и «разрешающей способностью», накладывающими определенные ограничения как на сами исследуемые объекты, так и на интерпретации полученных результатов.

Мультидисциплинарный подход особенно необходим при изучении сложнопостроенных и/или длительно развивавшихся комплексов, а также глубинных оболочек Земли, недоступных прямым наблюдениям с использованием методов полевой геологии. Целью данного доклада является: показать на ряде примеров, как изучение физических свойств и строения минералов и горных пород в экспериментах и в природных объектах позволило подойти к решению проблемы механизмов движения вещества в мантии; какое значение эти результаты имели для изучения коровых процессов, в частности, проградного гранулитового метаморфизма; какова роль последнего в формировании архейских золоторудных систем; какое значение имеют результаты прецизионного изотопного датирования гетерогенных цирконов и тонкой геохимии пород в решении проблемы строения, происхождения и эволюции зеленокаменных поясов (ЗКП) и древнейших сиалических ядер — главных компонентов архейских кратонов.

**Механизмы движения в мантии по результатам изучения пород и минералов.** При изучении в 60-х годах прошлого века сейсмическими методами дна океанов было установлено, что скорость продольной волны  $V_p$  вдоль срединно-океанических хребтов (СОХ) на  $0,3–0,7 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$  ниже, чем поперек их. Аналогичная анизотропия проявилась и у других характеристик, связанных с реологическими свойствами океанических пород. Для объяснения этого явления исследователи обратились к офиолитовым комплексам — выведенным на зем-

ную поверхность аллохтонам, сложенным породами океанической коры и мантии. Изучив ориентировки порообразующих минералов — клино-, ортопироксенов и оливинов в природно-деформированных дунитах, лерцолитах и перидотитах и рассчитав индикатрисы  $V_p$  минеральных агрегатов по упругим свойствам монокристаллов, они показали, что упругая анизотропия тектонитов определяется предпочтительной ориентировкой минералов [1]. Параллельное моделирование в экспериментах при осевом сжатии пород предпочтительной ориентировки слагающих их минералов в режиме:  $T = 900–1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 13,4–15 \text{ кбар}$  и скорость деформации  $\dot{\epsilon} = 7,8 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$  показало, что при синтектонической перекристаллизации ось [010] ортопироксенов и оливинов и минимальное значение  $V_p$  ориентируются параллельно оси максимального сжатия  $\sigma^{\text{max}}$ , две другие оси рассеиваются в пояс, а средняя для серии образцов анизотропия  $V_p = 0,76 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$  [2]. При этом важным механизмом движения вещества в океанических плитах является скольжение в главном минерале мантийных тектонитов — оливине, так называемое «карандашное», осуществляемое по системе (0kl)[100], и скольжение по системе (010)[100] [3]. Высокие температуры ( $950–1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ), при которых реализуются оба механизма предпочтительной ориентировки оливина, свидетельствуют о ее некорковой природе, что, в свою очередь, является убедительным доказательством офиолитовой природы мафит-ультрамафитовых ассоциаций.

**Гранулитовый метаморфизм средних сечений коры как источник флюидов.** Индикаторами термальных аномалий в земной коре являются гранулиты — наиболее высокотемпературные метаморфические породы, особенно широко представленные в архее, начиная с древнейших серогнейсовых комплексов, и в протерозое. Структурно-петрологическое изучение гранулитов Западной Карелии показало, что формирование дупироксен-роговообманковых ассоциаций отвечает термальному пику метаморфизма [4]. Использование принципов анализа предпочтительных ориентировок минералов, разработанных для мантийных пород, применительно к гранулитам и другим метаморфическим породам региона позволило показать сходство механизмов формирования мантийных и коровых тектонитов [5]. При последующем изучении структур, петрографии, минералогии, геохимии и изотопных возрастов гранулитов было установлено, что на рубеже  $2,67–2,65 \text{ Ga}$  повышение

температуры и спад давления были связаны с купольным адвективным подъемом земной коры и формированием Тулосского и Вокнаволоцкого блок-куполов как структур [6–8]. Декомпрессия гетерогенных комплексов сопровождалась дегидратацией гидроксилсодержащих минералов – биотита и роговой обманки при замещении их пироксенами, формированием «сухих» ассоциаций и освобождением значительных объемов агрессивных фторсодержащих флюидов. Умереннобарный режим этого типа гранулитового метаморфизма отвечает глубинам 13–18 км, т. е. средним сечениям земной коры. Такое же давление имел и позднеархейский метаморфизм, наложенный на архейские ЗКП Западной Карелии.

**Гранулитовый метаморфизм как важный элемент в моделях архейских золоторудных систем.** Синхронность гранулитового метаморфизма в зоне Капускесинг в кратоне Сьюпириор с мощными золоторудными процессами в ЗКП Абитиби позволила канадским геологам предложить модель гранулитизации средних и нижних сечений земной коры в качестве рудогенерирующего механизма [9]. Несмотря на некоторые ограничения, накладываемые на эту модель применительно к Абитиби [10, 11], флюидогенерирующая роль гранулитового метаморфизма несомненна. Более того, именно с гранулитизацией нижних и средних сечений земной коры в кратоне Йилгарн австралийские геологи связывают возникновение гидротермальных ячеек корового масштаба и генерацию Au-выщелачивающих и Au-транспортирующих флюидов, которые были сфокусированы наклонными shear-зонами и после их взаимодействия с магматогенным, связанным с гранитоидами флюидом сформировали гигантское Au-рудное месторождение Голден Майл [12–14]. В Западной Карелии и Восточной Финляндии корреляция структур, контролирующая гранулитовый метаморфизм в высокометаморфизованных комплексах, так и Au-рудные процессы в ЗКП, позволяет рассматривать гранулитизацию как важный региональный фактор Au-оруднения в позднем архее [10].

**Строение, происхождение и возраст архейских ЗКП и древнейших ядер кратонов.** Значение прецизионных методов изучения минералов и горных пород очень наглядно проявилось при решении обозначенных проблем в Костомукшском ЗКП и Маткалахтинском ЗКП Водлозерского палеократона.

*Костомукшский ЗКП* включает Костомукшскую структуру – синформу, сложенную вулканитами так называемой «западной полосы» и отложениями гимольской серии, и прилегающую с востока обширную территорию, на которой в полях гранитоидов сохранились реликты супракрустальных пород. Первоначально основные вулканиты «западной полосы» рассматривались как сумийский комплекс, несогласно налегающий на породы гимольской серии [15–17]. Впоследствии было установлено трехчленное строение супракрустального комплекса, кото-

рый включает нижнюю терригенную нюкозерскую толщу, контоккскую серию и несогласно залегающую осадочную гимольскую серию, вмещающую месторождение железистых кварцитов. Контоккская серия, согласно представлению о последовательном наращивании архейского разреза с запада на восток [18, 19], расчленялась на нижнюю ниэмиярвинскую и верхнюю рувинварскую свиты, сложенные базальтами и коматиитами, и разделяющую их шурловаарскую свиту, сложенную кислыми вулканитами и осадками (рис. 1).

Детальное структурное картирование «западной полосы» и сравнительный анализ слагающих ее разрезов позволили сформулировать вывод о том, что единый комплекс основных вулканитов и коматиитов «западной полосы» с несогласием перекрывает породы шурловаарской свиты [5] (рис. 1). Шурловаарская свита, весь разрез Костомукшского месторождения, разрезы северного замыкания структуры, включающего Корпангское месторождение, и узких нелинейных структур, расположенных восточнее, рассматривались как возрастные эквиваленты. С архейской историей связывалось и формирование вулканитов «западной полосы». В районе были выделены два принципиально различающихся структурных плана – линейный для мафического комплекса «западной полосы» и нелинейный для большинства площадей развития гимольской серии к северу и к востоку от Костомукшского месторождения. Позднее это было интерпретировано как результат тектонического совмещения доменов с разными исходными геотектоническими обстановками формирования супракрустальных комплексов, и Костомукшский ЗКП рассматривался как «совмещенный морфотип лопийских структур» [20].

Петрологические, изотопно-геохронологические и изотопно-геологические (С. Б. Лобач-Жученко и С. А. Сергеев) и литолого-геохимические (Р. И. Милькевич и Т. А. Мыскова) исследования позволили предложить схему строения контоккской серии, которая объединяет разновозрастные ниэмиярвинскую и рувинварскую свиты, перекрытые кислыми вулканитами шурловаарской свиты. Используя изотопный состав неодима в породах ниэмиярвинской и рувинварской свит, авторы показали, что часть пород в них несет признаки контаминации древним сиалическим материалом. Это рассматривалось авторами как доказательство рифтогенной интракратонной природы Костомукшского ЗКП [21]. Изотопно-хронологическое изучение разреза Костомукшской структуры и гранитоидов, выполненное в последнее десятилетие сотрудниками ИГЕМ, ГИН и ГЕОХИ, позволило показать синхронность формирования кислых вулканитов шурловаарской свиты, гранитоидов восточного и западного обрамлений структуры, а также кислых вулканитов в составе гимольской серии [22]. Геохимия базальтов и коматиитов обеих свит «западной полосы» – обеднение LREE при поло-

жительной аномалии Nb и данные по неодиму ( $\epsilon Nd(T) = +2,8 \div +3,4$ ) отвечают условиям магматизма в обстановке океанического плато, исключая, таким образом, обстановку континентального рифтогенеза. Кислые же вулканиты шурловаарской свиты несут признаки континентально-коровой природы. Все это позволило данным исследователям предложить аллохтонную модель обдукции океанического террейна – контоккской серии – на шельфовые отложения гимольской серии [23].

Следует подчеркнуть, что ни в одном из исследований не было сделано реперного U-Pb датирования по циркону низмиарвинской свиты, которая всеми цитируемыми исследователями, за исключением автора, рассматривалась как наиболее ранняя вулканогенная толща Костомукшского ЗКП. В начале 70-х годов прошлого века при детальном картировании структуры автором были обнаружены и описаны маломощные горизонты кислых туфогенных пород в низах разреза низмиарвинской свиты, которые рассматривались им как аналоги пород шурловаарской и гимольской серий [5, рис. 34]. Изучение цирконов из этих пород на приборе SHRIMP-II показало, что их конкордантный возраст составляет  $2791,7 \pm 6,1$  Ma (СКВО = 0,96), он практически совпадает с возрастными данными

пород в шурловаарской и гимольской сериях и обрамляющих гранитоидов. Последующие результаты прецизионного изучения методом ICP-MS геохимии малых элементов в кислых туфах низмиарвинской свиты, будучи сопоставленными с аналогичными данными по кислым вулканитам и плутонитам района [24], показали их удивительное сходство по топологии REE и спайдерграммам с кислыми породами гимольской серии и близость к породам шурловаарской свиты и гранитоидам BADR-серии восточного обрамления структуры. Эти данные являются вескими аргументами в пользу ранних представлений автора о строении пояса, базированных на геолого-структурных данных [5, 20], и в пользу более поздней мультистадийной модели его строения и эволюции, основанной на представлениях аккреционной тектоники [10] и построенной с учетом результатов, полученных широким кругом исследователей при изучении минерального вещества с использованием самых современных научных технологий. Согласно этой модели, ЗКП представляет собой аккрецированный коллаж, состоящий из синхронно сформированных в узкой зоне перехода «океан – континент» стратотектонических ассоциаций – океанического плато, задугового бассейна и окраинно-континентальной дуги.

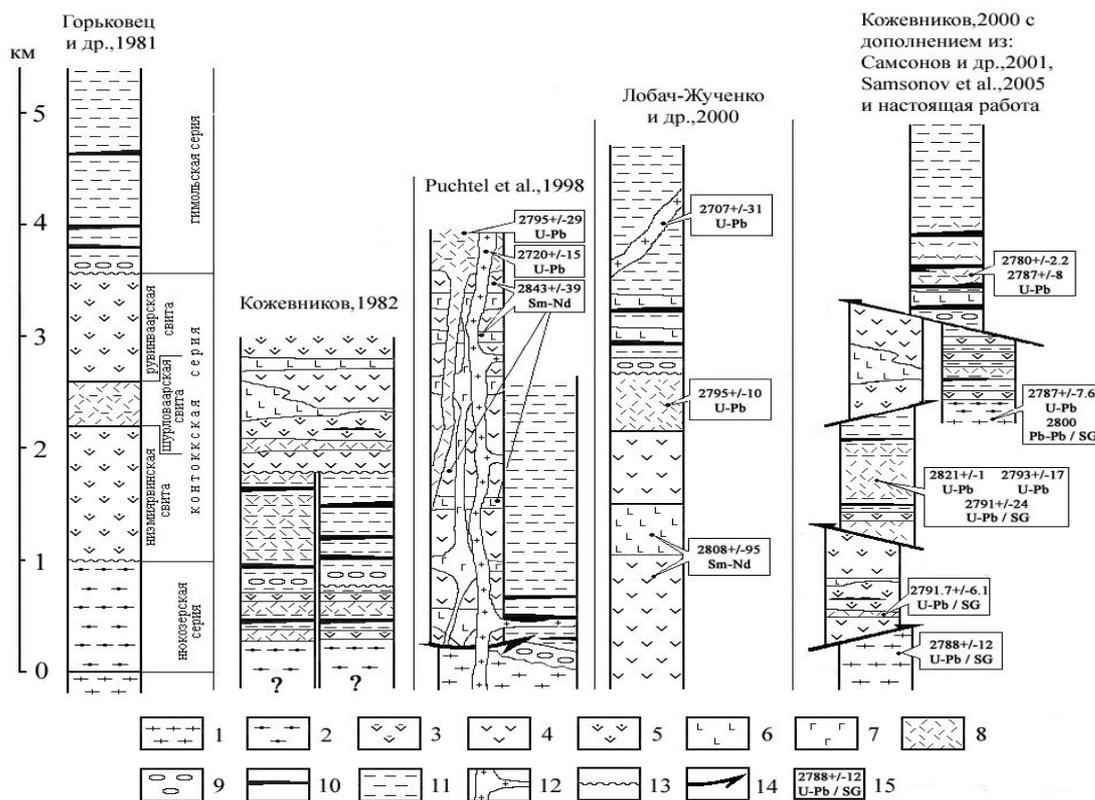


Рис. 1. Стратиграфические колонки Костомукшского ЗКП по разным авторам:

1 – гранитоидный ТТГ-комплекс обрамления; 2 – слюисто-кварцевые кристаллосланцы – нюкозерская серия; 3 – полевошпато-роговообманковые ( $\pm$ биотит,  $\pm$ эпидот) подрудные кристаллосланцы; 4 – подушечные базальты; 5 – массивные базальты; 6 – коматититы; 7 – силлы габбро; 8 – кислые вулканиты; 9 – полимиктовые конгломераты; 10 – железистые кварциты и сланцы; 11 – полимодальные граувакки с примесью дацитовых туфов; 12 – гранит-порфиры; 13 – поверхность несогласия с корой выветривания; 14 – надвиговые границы, разделяющие аллохтонные СТА; 15 – конкордантный изотопный возраст, SG – возраст определен по отдельным зернам циркона

Возрасты Маткалахтинского ЗКП и источников терригенных пород в его разрезе. Этот ЗКП, расположенный в центре древнего Водлозерского блока, по аналогии с другими обрамляющими его ЗКП относился к их ранней ( $>2,9$  Ga) генерации [10, 25]. Анализ материалов по скважинам, пробуренным финской компанией KIVIÄRVI при поисковых работах на никель, показал, что некоторые из них вскрыли редкий для Карельского кратона разрез, в котором горизонты кварцевых аренитов и полимодалных граувакк переслаиваются с базальтами и коматиитами, что позволило определить эту стратотектоническую ассоциацию (СТА) как платформенную. Подобные СТА обычно имеют ареальное распространение и приурочены к обрамлению древних сиалических ядер. Естественно ожидалось, что кварцевые арениты в разрезе интракратонного ЗКП должны содержать древние цирконы-носители информации о возрасте континентальной палеокоры Водлозерского протократона. Все это послужило основанием для изучения данных разрезов, в которых осадки представлены кварцевыми аренитами и полимодалными граувакками. Выделенные из обоих типов пород гетерогенные цирконы были изучены на приборе SHRIMP-II.

Анализ полученных датировок разнотипных цирконов из контрастных по зрелости пород показал, что наиболее древние окатанные и эвгедральные детритовые исходно магматические зерна имеют возраст  $3334 \pm 11 - 3289 \pm 19$  Ma, характеризуются низким содержанием U, и Th и высоким отношением Th/U и представлены исключительно в монофракции из кварцевых аренитов (рис. 2). Метаморфогенные зерна второй возрастной группы  $3259 \pm 72 - 3236 \pm 3$  Ma с высоким содержанием U, варьирующим и в целом низким содержанием Th и низким отношением Th/U представлены в обоих типах пород. Тот факт, что эти две возрастные

группы цирконов обнаруживаются в суперзрелых кварцевых аренитах, является отражением длительной эрозии, вскрывшей наиболее глубинный древний коровый источник, представленный гранитоидами, возраст которых составляет  $3329 \pm 16$  Ma, и метаморфитами, имеющими возраст  $3259 \pm 72 - 3236 \pm 3$  Ma. Третья возрастная группа –  $3172 \pm 7 - 3098,3 \pm 3,7$  Ma, представленная в обоих пробах, фиксирует второй эндогенный импульс, второе метаморфо-гидротермальное событие, оторванное на 100 Ma от предыдущего метаморфизма, возраст которого оценивается в  $3259 \pm 72 - 3236 \pm 3$  Ma, что на 200 Ma моложе первого корообразующего процесса в Водлозерском блоке, возраст которого определен как  $3329 \pm 16$  Ma. Наиболее молодая генерация циркона, возраст которой определяется интервалом  $2938 \pm 31 - 2779 \pm 41$  Ma, представлена окатанными магматическими зёрнами с низким содержанием U и высоким отношением Th/U. Эта генерация циркона фиксирует третье эндогенное событие. Большая часть зерен этой группы обнаруживается в кварцевых аренитах, что отражает разрушение малоглубинного источника, связанного с кислым вулканизмом данного возраста [26]. Значение возраста детритового циркона  $2779 \pm 41$  Ma, отвечающее минимальному возрасту разрушавшегося магматического источника, определяет на сегодняшний день максимальный возраст Маткалахтинского ЗКП. Это, в сочетании с новыми данными о возрасте Костомукшского ЗКП, свидетельствует о том, что в Карельском кратоне появляется все больше признаков наличия молодой генерации ЗКП, сформированной на завершении архея. Именно с этим интервалом архейской истории и с этой генерацией ЗКП связана глобальная металлогеническая эпоха, когда были сформированы многочисленные месторождения Au, Ni, PGE, полиметаллов и других полезных ископаемых.

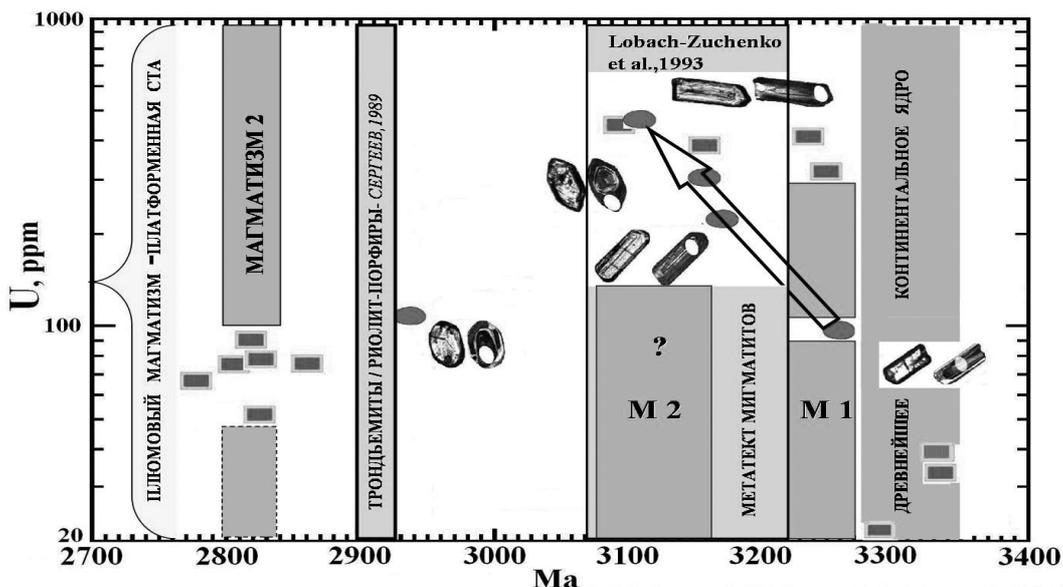


Рис. 2. Цирконы из осадков платформенной СТА Маткалахтинского ЗКП в координатах U–<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb-возраст (реконструкция событий в архее Водлозерского палеократона, по данным из [26–28])

Работа выполнялась в рамках бюджетного финансирования плановой темы НИР ИГ КарНЦ РАН «Архейские кратоны Земли: строение, происхождение,

эволюция, рудогенез» и при поддержке Приоритетной программы 5 ОНЗ РАН (проект 122) и регионального гранта РФФИ № 02-05-97507.

1. Carter N. L., Baker D. W., George R. P. Seismic anisotropy, flow, and constitution of the upper mantle // Flow and fracture of rocks. 1972. P. 167–190.

2. Avé Lallemant H. G., Carter N. L. Syntectonic recrystallization of olivine and modes of flow in the upper mantle // Geol. Soc. Amer. Bull. 1970. V. 81, N 8. P. 2203–2220.

3. Carter N. L., Avé Lallemant H. G. High temperature flow of dunite and peridotite // Ibid. P. 2181–2202.

4. Лазарев Ю. И., Кожевников В. Н. Структурно-петрологическое изучение гранитизации. Л., 1973. 124 с.

5. Кожевников В. Н. Условия формирования структурно-метаморфических парагенезисов в докембрийских комплексах. Л., 1982. 184 с.

6. Кожевников В. Н., Белоусов Е. Ф. Некоторые черты гранулитового метаморфизма архейских образований района оз. Тулос // Геология и полезные ископаемые Карелии: Опер.-информ. материалы. Петрозаводск, 1981. С. 7–10.

7. Кожевников В. Н., Чухонин А. П., Шулешко И. К. Полихронный высокотермальный метаморфизм древнейших пород Западной Карелии // ДАН СССР. 1987. Т. 292, № 6. С. 1441–1445.

8. Щипцов В. В., Кожевников В. Н., Скорнякова Н. И. Гранитоиды архея юго-восточной части Балтийского щита. Л., 1987. 119 с.

9. Cameron E. M. Archean gold: Relation to granulite formation and redox zoning in the crust // Geology. 1988. V. 16. P. 109–112.

10. Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск, 2000. 223 с.

11. Кожевников В. Н., Голубев А. И., Рыбаков С. И. Факторы контроля золотометалльного оруденения в архейских зеленокаменных поясах: сравнительный анализ Сьюпириор и Карельского кратонов // Отечественная геология. 1998. № 3. С. 55–64.

12. Hall G. Autochthonous model for gold metallogenesis and exploration in the Yilgarn // Geodynamics & gold exploration in the Yilgarn. Workshop abstr., 6 August 1998, Perth, Australia. P. 32–35.

13. Lambert D., Frick L., Bateman R., Stone W. Geochemistry and rock-fluid interactions in Archean Lode-Gold Systems: new insights from the Re-Os isotopic system // Ibid. P. 40–44.

14. Ord A., Hobbs B. E., Walshe J. L., Zhao C. Development in the simulation of geodynamic processes with direct application to Yilgarn gold mineralization // Ibid. P. 45–51.

15. Кратц К. О. Геология карелид Карелии. М.; Л., 1963. 210 с.

16. Чернов В. М. Стратиграфия и условия осадконакопления вулканогенных (лептитовых) железисто-кремнистых формаций Карелии. М.; Л., 1964. 123 с.

17. Лазарев Ю. И. Структурная и метаморфическая петрология железистых кварцитов Костомукшского месторождения. Л., 1971. 191 с.

18. Горьковец В. Я., Раевская М. Б., Белоусов Е. Ф. и др. Геология и металлогения Костомукшского железорудного месторождения. Петрозаводск, 1981. 142 с.

19. Опорные разрезы верхнеархейских отложений. Петрозаводск, 1992. 191 с.

20. Кожевников В. Н. Геология и геохимия архейских северокарельских зеленокаменных структур. Петрозаводск, 1992. 199 с.

21. Лобач-Жученко С. Б., Милькевич Р. И., Арестова Н. А. и др. Стратиграфический разрез Костомукшской структуры Карелии (верхний архей), реконструкции на основе геохронологических, геохимических и изотопных данных // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2000. Т. 8, № 4. С. 3–10.

22. Самсонов А. В. Эволюция магматизма гранит-зеленокаменных областей Восточно-Европейского кратона: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2004. 48 с.

23. Puchel 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.

24. 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. P. 83–106.

25. Минерально-сырьевая база Республики Карелии. Кн. 1: Горючие полезные ископаемые. Металлические полезные ископаемые. Петрозаводск, 2005. 280 с.

26. Сергеев С. А., Бибикова Е. В., Левченков О. А. и др. Изотопная геохронология Волдозерского гнейсового комплекса // Геохимия. 1990. № 1. С. 73–83.

27. Lobach-Zhuchenko S. B., Cherkulaev V. P., Sergeev S. A. et al. Archean rocks from southeastern Karelia (Karelian granite-greenstone terrain) // Precamb. Res. 1993. V. 62. P. 375–398.

28. Кожевников В. Н., Бережная Н. Г., Пресняков С. Л. и др. Геохронология циркона (SHRIMP-II) из архейских стратотектонических ассоциаций в зеленокаменных поясах Карельского кратона: роль в стратиграфических и геодинамических реконструкциях // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14, № 3. С. 19–41.

## ОСОБЕННОСТИ ГРАНУЛИТОВОЙ АМФИБОЛИЗАЦИИ В ГРАНУЛИТ-ЭНДЕРБИТ-ЧАРНОКИТОВЫХ КОМПЛЕКСАХ КАРЕЛИИ

*Н. Е. Король*

Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск; [korol@krc.karelia.ru](mailto:korol@krc.karelia.ru)

Амфиболизация пород обычно связывается с условиями метаморфизма амфиболитовой фации.

В архейских гранулит-эндербит-чарнокитовых (ГЭЧ) комплексах Карелии [1–6], сформировав-