

ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.1/4.1

А.К. СОКОЛОВСКИЙ, В.Я. ФЕДЧУК, А.К. КОРСАКОВ, А.В. ГАЛАНИН

ГРАНУЛИТОВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ
И ИХ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ С ЗЕЛЕНОКАМЕННЫМИ ПОЯСАМИ

Предложена генетическая классификация структур, образованных гранулитовыми комплексами, рассмотрены их пространственно-временные и генетические соотношения с зеленокаменными поясами, закономерно менявшиеся в связи с эволюцией геодинамических режимов тектоносферы

В строении и формировании континентальной коры раннего докембрия определяющую роль играли структуры, образованные гранулитовыми и зеленокаменными структурно-вещественными комплексами. Выяснение их пространственно-временных и генетических соотношений — одна из ключевых проблем в понимании эволюции земной коры на ранних этапах ее развития. Существуют три точки зрения на эти соотношения: гранулитовые образования отличаются от зеленокаменных по возрасту и тектоническим условиям своего формирования; высокометаморфизованные образования представляют собой глубинно-коровые эквиваленты гранит-зеленокаменных ассоциаций; гранулитовые и зеленокаменные образования в общем одновозрастные, но соответствуют разным тектоническим условиям.

Выполненные авторами исследования показали, что все перечисленные варианты соотношений гранулитовых и зеленокаменных комплексов имеют место, но между разными генерациями (возрастными и генетическими типами) образуемых комплексами структур.

Зеленокаменные комплексы участвуют в строении гранит-зеленокаменных, гнейс-зеленокаменных, гранулит-зеленокаменных областей и зеленокаменных поясов [8].

Гранит-зеленокаменные области — древнейшие ядра кратонов, характеризующиеся ареально-купольным структурным планом, представляют собой единые геодинамические системы зеленокаменных поясов и гранито-гнейсовых куполов. К геоструктурам этого типа относятся раннедокембрийские провинции с возрастом 3,9–3,3 млрд. лет (Каапваальская и Зимбабвийская провинции Южной Африки, блок Пилбара в Австралии, Юго-Западная Гренландия). Зеленокаменные комплексы составляют в них 10–40 %, остальное приходится на гранитоидные интрузии и гнейсовые комплексы

тоналит-грондземитового состава («серые гнейсы»), образующие так называемый гранитный слой и купольные структуры. Мощность коры в гранит-зеленокаменных областях могла достигать 25–35 км, что в сочетании с высоким тепловым потоком предопределяет возможность высокоградIENTного гранулитового метаморфизма нижних горизонтов и возникновение гранулитогнейсовых областей [9, 10]. Гранитизация и тоналитобразование в центральных частях гранит-зеленокаменных областей обуславливают их изостатическое воздымание, сопровождающееся денудацией и выведением на поверхность нижних, в том числе и гранулитовых, уровней геоструктур [8].

Гнейс-зеленокаменные области (раннедокембрийские провинции Йилгарн, Олекминская, Карельская, Сьюпириор и др.) отличаются линейным структурным планом, который определяется гранит-зеленокаменными поясами (суперпоясами по Конди [4]), чередующимися с тектоническими блоками, сложенными парагнейсами и гранитоидами. Подобные области формировались на окраинах гранит-зеленокаменных областей в интервале 3,3–2,6 млрд. лет.

Зеленокаменные пояса представляют собой специфические раннедокембрийские синформные структуры, развивавшиеся как области интенсивных тектоно-магматических процессов, приводивших к новообразованию континентальной коры, и сложенные преимущественно осадочно-вулканогенными комплексами, метаморфизованными не выше амфиболитовой фации. Эти структуры периодически зарождались на протяжении всего раннего докембрия, в течение которого закономерно эволюционировали: сменилось несколько генераций. Особенности геологического строения и условий образования позволяют выделить три основных генетических типа зеленокаменных поясов: плюмтектонический, пермобильный (переход-

ный тип) и плейттектонический, различающиеся геодинамическими обстановками и механизмами формирования [7, 8]. В структуре фундамента древних платформ пояса занимают различное тектоническое положение.

Древнейшие из них — зеленокаменные пояса плюмтектонического типа (Исуа, Барбертон, Мурчисон, ранние зеленокаменные пояса Зимбабве, Восточной Пилбары и др.) — в сочетании с гранито-гнейсовыми куполами и интрузиями гранитоидов образуют гранит-зеленокаменные области. В составе зеленокаменных комплексов преобладают метаморфизованные в условиях зеленосланцевой фации эффузивные породы коматиит-толеитовой ассоциации с подчиненным объемом кислых вулканитов и метасадочных пород, представленных граувакково-аргиллитовыми отложениями, в меньшей степени эвапоритами, кремнистыми образованиями и железистыми кварцитами. Коматииты относятся в основном к барбертонскому, деплетированному алюминием типу; толеиты по петрогеохимическим характеристикам близки к океаническому базальтам T-MORB. Нижние части разрезов сложены коматиит-толеитовой ассоциацией, вверх по разрезу она сменяется вулканогенно-осадочными и осадочными отложениями с ведущей ролью обломочных пород. Происхождение этих поясов, как и гранит-зеленокаменных областей в целом, наиболее удачно объясняется в рамках плюмтектонической модели [8, 10].

Зеленокаменные пояса пермобильного типа, возраст которых колеблется в интервале 3,3–2,6 млрд. лет, образуют гранит-зеленокаменные суперпояса (такие как Абитибиде, Норсмен-Уилуна, Олондинский и др.) в гнейс-зеленокаменных областях. В пределах суперпоясов зеленокаменные комплексы перемежаются с гранито-гнейсами и интрузиями тоналит-трондземит-гранодиоритового состава. Суперпояса обычно расположены сериями, обрамляя и наращивая раннеархейские ядра кратонов. Линейная форма поясов с характерной латеральной фациальной изменчивостью, широкое распространение вулканитов известково-щелочной серии, геохимическое и общее сходство с современными обстановками островных дуг и задуговых бассейнов показывают, что эти структуры формировались в условиях начальной формы тектоники плит [8]. Завершение развития пермобильных поясов в аккреционном, а затем и в коллизионном режимах 2,8–2,6 млрд. лет тому назад сопровождалось интенсивными деформациями латерального сжатия, образованием покровно-надвиговых ансамблей, гранитоидным магматизмом, высокобарическим гранулитовым метаморфизмом древних комплексов, существенным увеличением размеров и мощности континентальных плит [8]. Их коллизия привела в конце позднего архея к образованию суперконтинентов или единого суперконтинента — Пангеи I, о чем свидетельствует глобальная синхронность и сопряженность высокобарического метаморфизма, интенсивного гранитообразования и завершающих стадий развития пермобильных зеленокаменных поясов [4, 11].

Зеленокаменные пояса плейттектонического типа (2,6–1,7 млрд. лет) имеют, как правило, отчетливо выраженные линейные очертания и зани-

мают секущее по отношению к архейским структурам окраинное или внутриплитное положение, располагаясь по границам древних кратонов или их составных частей (Циркум-Унговский в Канаде, Амазар-Гилуийский и Унахинский на Сибирской платформе, Печенга-Имандра-Варзугский и Ветреный Пояс на Балтийском щите). Фрагментам разрезов поясов присущи формационные и петрогеохимические признаки образования в геодинамических обстановках континентальных рифтов, срединно-океанических хребтов, островных дуг, задуговых бассейнов и зон коллизии, что согласуется с плейттектонической моделью формирования этих структур в течение четырех последовательных стадий цикла Уилсона [7, 8]. Обычно это одиночные пояса. В тех случаях, когда серии плейттектонических поясов образуются на древнем гранулитогнейсовом основании (например, в Становом мегаблоке Алданского щита), возникают гранулит-зеленокаменные области, состоящие из блоков высокометаморфизованных пород, спаянных зеленокаменными поясами. Развитие зеленокаменных поясов плейттектонического типа завершилось в конечном счете образованием (или воссозданием) единого суперконтинента — Пангеи II [10].

Гранулитовые комплексы распространены в раннедокембрийских структурах двух основных генетических типов: ареальных денудационных — в гранулитогнейсовых областях, представленных высокометаморфизованными гранит-зеленокаменными образованиями и линейных аккреционно-коллизионных — в гранулитовых поясах, образовавшихся в результате жесткого взаимодействия континентальных плит.

Гранулитогнейсовые области (западная гнейсовая территория провинции Йилгарн в Австралии, гранулитогнейсовые области Алданского щита и Гренландии, Беломорский геоблок, блок Унгава Канадского щита и др.) имеют раннеархейский возраст, занимают (или занимали) центральное положение в структуре древних кратонов и представляют собой выведенные к поверхности метаморфизованные в гранулитовой фации глубинные уровни длительно воздымавшихся и подвергавшихся денудации геоблоков континентальной коры гранит-зеленокаменного типа [10]. Характерно надвигание таких геоблоков на смежные гнейс-зеленокаменные образования. Гранулитогнейсовые области отличаются сложным строением и длительной историей развития. Слагающие их структурно-вещественные комплексы, первоначально метаморфизованные в высокоградиентных условиях гранулитовой фации умеренных давлений, в дальнейшем, как правило, подвергаются низкоградиентному высокобарическому гранулитовому метаморфизму и неоднократному диафтозу [1, 3]. Особенностью гранулитогнейсовых областей, как и гранит-зеленокаменных, являются овально-купольные структуры, сложенные древнейшими гранитоидами серогнейсового комплекса [5], и фрагменты супракраустальных комплексов — реликты зеленокаменных поясов. От гранит-зеленокаменных областей их отличают более интенсивные тангенциальные напряжения, связанные с аккреционно-коллизионными обстановками развития на сопредельных территориях позднеархей-

ских и раннепротерозойских мобильных поясов. Серогнейсовый комплекс представлен тоналитовыми гнейсами, плагиогранито-гнейсами, гнейсогранитами, эндебритами (тоналитами) и чарнокитами (гранодиоритами), содержит включения, будины, линзы и останцы супракrustальных пород, размеры и количество которых увеличиваются в периферических частях гранулитогнейсовых областей. В составе включений преобладают лавы основного состава, по петрогеохимическим характеристикам близкие к толеитам океанического дна, достаточно широко распространены коматииты барбертонского типа, встречаются кислые вулканиды, кремнистые и карбонатные породы, граувакки, алевролиты, пелиты, железистые кварциты [2, 5]. Низы более полных разрезов в останцах обогашены ультраосновными эффузивными коматиитовой серии, в верхних частях преобладают осадочные образования. В целом исходный состав супракrustальных комплексов отвечает типичному разрезу раннеархейских плюмтектонических зеленокаменных поясов. Парагенетические ассоциации метаморфических минералов показывают, что породы были погружены в процессе метаморфизма на глубины 30—35 км [4]. На современном эрозионном срезе гранулитогнейсовые области практически повсеместно оказываются ограниченными зонами глубинных разломов и окаймляются парагнейсовыми поясами — продуктами разрушения длительно воздымавшихся блоков этих областей. Близкий возраст, структурно-формационное и петрогеохимическое сходство гранулитогнейсовых и гранит-зеленокаменных образований позволяют считать их разными эрозионными уровнями гранит-зеленокаменных областей.

Гранулитовым поясам (Лапландский пояс Балтийского щита, Зверевско-Сутамский на Алданском щите, Лимпопо в Южной Африке и др.) свойственны особенно интенсивные латеральные деформации и высокобарический гранулитовый метаморфизм. Такие пояса разделяют и окаймляют геоблоки континентальной коры, представленной гранулитогнейсовыми, реже гранит-зеленокаменными образованиями. С учетом тектонической позиции и геодинамических условий формирования среди гранулитовых поясов могут быть выделены три подтипа: тыловодужный покровно-надвиговый (Лапландский); внутриконтинентальный фронтально-надвиговый (Зверевско-Сутамский) и рифтогенный (Лимпопо). Первые два подтипа формировались в раннем протерозое, третий, по-видимому, характерен для позднего архея.

Гранулитовые пояса рифтогенного подтипа (внутриконтинентальных областей растяжения) разделяют раннеархейские гранит-зеленокаменные области и образуются главным образом за счет их тектоно-метаморфической переработки структурно-вещественных комплексов последних [11]. Границы поясов этого подтипа нечеткие с постепенными переходами от высокобарических гранулитов в центральной зоне структур к менее интенсивно метаморфизованным, вплоть до зеленосланцевой фации, породам гранит-зеленокаменных областей, что отражает возрастание геотермического градиента по направлению к поясам. Краевые зоны поясов обычно расланцованы и отделя-

ются от центральной зоны сдвигами. Пояса зарождались как рифтогенные структуры, а завершали развитие в обстановке интенсивного латерального сжатия и высокобарического гранулитового метаморфизма, связанной с аккрецией пермобильных зеленокаменных поясов на сопредельных территориях и коллизией гранит-зеленокаменных геоблоков. Так, развитие гранулитового пояса Лимпопо в рифтогенном режиме происходило 3,3—2,8 млрд. лет назад и сопровождалось подъемом геозотерм и ранним высокоградиентным метаморфизмом пониженных давлений 2,9—2,8 млрд. лет назад, а наиболее интенсивные деформации латерального сжатия и высокобарический гранулитовый метаморфизм относится к интервалу 2,7—2,6 млрд. лет, что совпадает со временем завершения развития поздеархейских зеленокаменных поясов [4].

Тыловодужные покровно-надвиговые гранулитовые пояса, тектонотипом которых может служить Лапландский пояс Балтийского щита, разделяют гранулитогнейсовые области или их фрагменты и развивались в условиях активной континентальной окраины с последующей коллизией континентальных плит и формированием в задуговой области покровно-надвиговых ансамблей [6]. Внутреннее строение поясов осложнено многочисленными надвигами, гранит-мигматитовыми куполами и пегматитовыми полями, часто устанавливаются интрузии габбро-анортозитов и инвертированная метаморфическая зональность, обусловленная крупными покровами. Для структурно-вещественных комплексов характерны признаки полистадийного проявления высокобарических метаморфических процессов регрессивной направленности, которые отвечают этапу интенсивного сжатия и отдельным стадиям покровообразования. В строении поясов участвуют гранулиты основного и кислого составов, образующие не закономерно чередующиеся тектонические покровы. В их основании обычно фиксируются зоны тектонического меланжа, включающие деформированные породы подошвенного комплекса и плитообразные тела подвергшихся метаморфозу габбро-анортозитов. Основные гранулиты представлены мезо- и меланократовыми, часто гранатсодержащими, двупироксеновыми, орто- и клинопироксеновыми кристаллическими сланцами, по петрогеохимическим характеристикам сопоставимыми с толеитами островодужного, океанического и континентального типов, известково-щелочными и высокомагнезиальными базальтами. Кислые гранулиты — биотит-силлиманит-гранатовые, биотитовые и кордиерит-биотитовые гнейсы — интерпретируются как терригенные отложения пассивной континентальной окраины и кислосредние островодужные вулканиды. Внедрение расслоенных тел габбро-анортозитов отвечало обстановке континентального рифтогенеза. При сопоставлении гранулитовых поясов этого подтипа с одновозрастными зеленокаменными поясами является значительное сходство исходного состава структурно-вещественных комплексов и геодинамических обстановок формирования, за исключением более интенсивно выраженной коллизионной стадии в гранулитовых поясах. Фрагменты разрезов тех и других поясов характеризуются форма-

ционными и петрогеохимическими признаками образования в геодинамических обстановках континентальных рифов, срединно-океанических хребтов, островных дуг, задуговых бассейнов и зон коллизии, что согласуется с плиттектонической моделью происхождения поясов. Интенсивные коллизионные процессы в гранулитовых поясах, сопровождавшиеся высокобарическим метаморфизмом, приводили к образованию в тылу островных дуг крупных покровов, скупиванию и увеличению мощности коры, результатом чего явились реоморфизм и частичное ее плавление с возникновением купольных структур.

Гранулитовые пояса фронтально-надвигового подтипа формировались в условиях коллизии жестких, кратонизированных континентальных плит в результате выдавливания тектонических пластин глубинных высокометаморфизованных пород, по времени совпадавшего с коллизионной стадией развития плиттектонических зеленокаменных поясов. Примером таких структур является Зверевско-Сутамский пояс высокобарических гранулитов субширотного простирания, расположенный в южном обрамлении Алданской гранулитогнейсовой области. Он состоит из отдельных блоков высокометаморфизованных осадочно-вулканогенных толщ нижнего архея, составлявших периферическую зону гранулитогнейсовой области, надвинутых на гранулитогнейсовые и гнейс-зеленокаменные образования Алданского геоблока по предстановочной системе пологих надвигов. Блоки гранулитов имеют тектонические контакты, окружены со всех сторон зонами бластомилонитов и диафоритов и представляют собой тектонические пластины средней коры мощностью 15–20 км, выведенные на уровень современного эрозионного среза вдоль межформационных срывов. Формирование Зверевско-Сутамского гранулитового пояса было связано с развитием в Становом мегаблоке раннепротерозойских зеленокаменных поясов, завершившимся коллизией континентальных плит, образованием межформационных срывов и выведением к поверхности блоков высокометаморфизованных пород фундамента [10].

Таким образом, можно констатировать, что пространственно-временные и генетические соотношения гранулитовых и зеленокаменных образований менялись в течение раннего докембрия в соответствии с эволюцией геодинамических режимов тектоносферы [10].

В раннем архее в условиях функционирования плюм-тектоники и преобладания вертикальных тектонических движений образовались гранит-зеленокаменные области, мощность коры которых достигала 25–35 км, что в сочетании с высоким тепловым потоком предопределило возможность регионального проявления гранулитового метаморфизма и возникновение денудационных гранулитогнейсовых областей, которые следует рассматривать как глубинно-коровые эквиваленты гранит-зеленокаменных областей.

В позднем архее на окраинах гранит-зеленокаменных областей в режиме начальной формы тектоники плит формировались гнейс-зеленокаменные области, образованные сериями последовательно аккрегированных гранит-зеленокаменных суперпоясов. Сопряженно с ними, но в обстановках тектоно-магматической активизации и внутриконтинентального растяжения возникли гранулитовые пояса рифтогенного подтипа, завершение развития которых и высокобарический гранулитовый метаморфизм были связаны с аккрецией суперпоясов и коллизией геоблоков гранит-зеленокаменного состава.

В раннем протерозое зеленокаменные и гранулитовые пояса развивались параллельно в режиме тектоники литосферных плит. Гранулитовые пояса окончательно сформировались в обстановке жесткой коллизии континентальных плит гранулитогнейсового типа и отличаются от зеленокаменных поясов более интенсивными латеральными деформациями и метаморфизмом. При наложении раннепротерозойских зеленокаменных поясов на древнее гранулитогнейсовое основание возникали гранулит-зеленокаменные области, в которых гранулитовые образования отличаются от зеленокаменных как по возрасту, так и по тектоническим условиям формирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 00-05-65044)

ЛИТЕРАТУРА

1. Володичев О.И. Беломорский комплекс Карелии (геология и петрология). Л., 1990. 248 с.
2. Глуховский М.З., Моралев В.М., Кузьмин М.И. Гранулит-базитовые комплексы раннего докембрия и их металлогеническое значение // Металлогения раннего докембрия СССР. Л.: Наука, 1984. С. 105–110.
3. Другова Г.М. Главные этапы метаморфизма чупинской толщи Беломорского пояса (Балтийский щит) // Матер. междунар. совещ. «Докембрий Северной Евразии». СПб, 1997. С. 31–32.
4. Конди К. Архейские зеленокаменные пояса. М.: Мир, 1983. 374 с.
5. Моралев В.М., Глуховский М.З. Архейская и раннепротерозойская тектоника // Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир, 2001. С. 50–90.
6. Минц М.В., Глазнев В.Н., Конилов А.Н. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры. Тр. ГИН. В. 503. М.: Научный мир, 1996. 287 с.
7. Соколовский А.К., Федчук В.Я., Корсаков А.К. Эволюция зеленокаменных поясов в раннем докембрии // Изв. вузов. Геология и разведка. 1994. № 6. С. 3–12.
8. Соколовский А.К., Федчук В.Я., Корсаков А.К. Геодинамические обстановки формирования зеленокаменных поясов. М.: МГРУ. 2003. 186 с.
9. Федчук В.Я., Соколовский А.К., Корсаков А.К., Галанин А.В. Эволюция континентальной коры Алдано-Станового региона в раннем докембрии // Изв. вузов. Геология и разведка. 1999. № 5. С. 3–9.
10. Федчук В.Я., Соколовский А.К., Корсаков А.К. Эволюция континентальной коры в раннем докембрии (на примере Карельского и Алдано-Станового регионов) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2002. № 3. С. 3–9.
11. Хайн В.Е. Основные проблемы современной геологии (геология на пороге XXI века). М.: Наука, 1995. 190 с.

Московский государственный геологоразведочный университет

Рецензент — В.М. Моралев