

## СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГІЧНІ ПРОЯВИ ТЕКТОНО-МАГМАТИЧНОЇ АКТИВІЗАЦІЇ

УДК 551.25(680)

Л.Л.Перчук, д-р геол.-минералог. наук

### ДИНАМИКА И СТАНОВЛЕНИЕ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ В ДОКЕМБРИИ

Існує лише один шлях прямого пізнання теплової й динамічної історії давньої кори. Це – геотермобарометрія рівноваг, заснована на хімічній зональності мінералів. Її ефективність демонструється на прикладі аналізу еволюції докембрійської континентальної кори, що на 90 % представлена кратонами і гранулітовими комплексами, часто переробленими в протерозої. Доведено, що, на противагу модним колізійним моделям, грануліти є продуктами глибокої кратонізації архейських зеленокам'яних поясів. Поряд з відсутністю в докембрії еклогіт-глаукофансланцевих комплексів, а також достатнього обсягу продуктів ерозії гранулітів, показано, що вони успадковують основні геохімічні характеристики архейських зеленокам'яних поясів, молодші останніх. Як правило, грануліти утворюють гігантські гарполіти, насунутих на породи кратонів, які до них примикають. Поряд зі згаданою вище геологічною інформацією поки не існує фізичної моделі, що здатна пояснити прогрів нижньої частини кори в області колізії до Р-Т параметрів гранулітів. Як альтернативу запропоновано модель ексгумації гранулітових комплексів і синхронного занурення порід кратонів, що примикають, у ході гравітаційного перерозподілу під впливом мантіїних флюїдно-теплових потоків (плюмів). Модель підтримується наявністю одновікових з гранулітами контактних зон пластичних деформацій, а також відкриття в гранулітах того самого комплексу як декомпресійних, так і ізобаричних Р-Т трендів. Механізми підйому гранулітів до поверхні кори і синхронного занурення порід кратонів, що примикають, ілюструються результатами чисельного гідродинамічного моделювання. Таким чином, гранулітові комплекси докембрію виникають з матеріалу зеленокам'яних поясів в основі тонкої (близько 35–40 км) земної кори під впливом мантіїного плюму, а потім піднімаються до поверхні, витісняючи вниз щільніші породи зеленокам'яних поясів, які, у свою чергу, можуть піддаватися глибокому метаморфізму. Гравітаційний перерозподіл порід лежить в основі геодинаміки земної кори в докембрії.

*A new model of gravitational redistribution of rocks within the Precambrian crust, which might have been triggered by a mantle-derived plume has been developed. The model was multidisciplinary tested for granulite complexes (HGT) located within cratons (GSB). The HGT are always younger than the adjacent GSB and their lithologies are chemically identical to those from the GSB. Both the IC and the DC paths can be identified in the same HGT. The IC path characterizes the contact of the HGT with the GSB, while DC paths are common P-T paths for the rocks located far from this contact. Mineral equilibria from the juxtaposed GSB in the footwall sections of the bounding shear zones record P-T loops: peak P-T conditions were reached at the lowest P-T conditions recorded by the adjacent granulites. This model suggests synchronous movement of GSB during exhumation of the adjacent HGT and their identical isotopic ages. While granulites move up to the surface, cool metabasalts and metakomatiites move down, cooling the granulites along the contact zone. The existence of both DC and IC paths in the same granulite complex can thus be explained by differences in the movement of different granulite "blocks" during exhumation. In many HGT the Archaean granulites were not exhumed to the surface until hundreds of millions years later. The gravitational redistribution model has been tested by 2D numerical simulation showing that the granulite facies terrains may have develop as crustal scale intrusive-shaped bodies during ~10 My. Tectonospheric by seismic tomography, supports the model.*

#### Введение

Архейская континентальная кора почти на 90 % сложена гранит-зеленокаменными поясами (ГЗП) и гранули-

товыми комплексами (ГК). Последние обычно слагают фундамент платформ и являются наиболее высокотемпературными метаморфическими образованиями. Анализ условий их формирования и эволюции был и остае-

тся одним из наиболее сложных и увлекательнейших направлений метаморфической геологии, ибо именно в ГК наиболее полно записана ранняя история земной коры. Большинство ГК представляет вскрытую эрозией нижнюю кору. Результаты исследования ГК посвящены многочисленным публикациям, а гипотезы их происхождения и эволюции отличаются поразительным разнообразием [22, 46]. В общем случае подъем ГК к поверхности ("экзгумацию") связывают с коллизионными или субдукционными процессами. Эти представления, однако, наталкиваются на две общеизвестные проблемы: 1) отсутствие осадков, которые должны накопиться в результате частичной эрозии ГК, и 2) отсутствие ультравысокобарных ( $P > 15$  кбар) ГК.

**Проблема осадков.** Обычный эрозионный механизм появления гранулитов на поверхности подразумевает размыв и перенос огромных масс пород (сотни тысяч кубических километров) до глубин не менее 25–30 км. Но такое количество докембрийских осадков не обнаружено ни в одном регионе, где широко представлены кратоны и ГК. Так, например, на Кольском п-ве и в Карелии вообще не обнаружены мощные осадочные комплексы, которые неизменно должны были возникнуть в результате эрозии Лапландского ГК, выведенного на поверхность с глубин порядка 30 км 1,8–1,9 млрд лет тому назад.

**Отсутствие ультравысокобарных ГК.** Согласно эрозионной модели утолщенной коры в ее основании должны оставаться наиболее высокотемпературные ( $T > 900^\circ\text{C}$ ) и высокобарные ( $P > 15$  кбар) гранулиты. Однако они пока не обнаружены в ксенолитах из трубок, прорывающих ГК [14]. Обычно Р-Т оценки для коровых ксенолитов из диатрем близки к Р-Т параметрам вскрытых эрозией ГК [5].

Процесс формирования ГЗП носит название кратонизации. Если ГЗП в последующее время не претерпели метаморфизма и сохранились с докембрийских времен в первозданном виде как стабильный участок земной коры, их принято называть кратонами. Между тем, взаимоотношения ГК с кратонами долгое время было не определено прежде всего из-за неясности геологической обстановки и плохой обнаженности прямых контактов. Одно время даже считалось, что переход между ними постепенный, свидетельствующий об одновозрастности образования гранулитов и ГЗП [26]. Позднее выяснилось [35, 48], что ГЗП и ГК разделены ширзонами (ШЗ) (от "shear zone", англ.) – в отечественной литературе этому термину соответствует понятие "зона сдвиговых пластических деформаций". Иногда ШЗ прослеживаются на десятки, а то и на сотни километров [48, 38]. Их мощность варьирует от первых метров до нескольких километров. В редких случаях ШЗ совпадают с региональными тектоническими швами (рис. 1). Высказана гипотеза [8, 10, 34], что кратонизация ГЗП завершается не формированием гранитных куполов [24], а становлением ГК по механизму гравитационного перераспределения [31, 40, 34, 37]. В течение последующих 10 лет эта идея получила развитие [35, 36, 18, 19], кратко изложенное в этой статье. Более подробные сведения о разнообразных вопросах рассматриваемой концепции приведено в цитируемых работах.

Интерес к динамике ГК существенно оживился в связи с развитием теории фазового соответствия и термобарометрии, что позволило разработать методы вывода Р-Т трендов эволюции метаморфических пород [7, 27, 28, 20]. Р-Т тренды – единственная точная запись изменения  $T$  и  $P$  в ходе геодинамической истории пород. Других просто нет. Поэтому на них основываются все современные теоретические разработки геодинамических

моделей. Для ГК характерны исключительно ретроградные Р-Т тренды [29, 30, 22]. Более ранний этап истории гранулитов практически полностью "затерт" в ходе их высокотемпературной перекристаллизации на пике метаморфизма. На основе обобщения Р-Т трендов для ~90 ГК С.Харли [22] выделил две группы: тренды изобарического остывания (IC) и тренды декомпрессии и сопряженного остывания (DC). Различия в форме Р-Т трендов неизменно связывается с путями подъема ГК к поверхности [46, 45].

Большинство моделей экзгумации гранулитов так или иначе связано с коллизионными или же субдукционными механизмами. Полный цикл Уилсона, столкновение континентов с последующим растяжением земной коры, отделение и погружение в мантию литосферы за счет ее эклогитизации, тектоническое выдавливание блоков земной коры с последующей эрозией – наиболее популярные модели появления на поверхности ГК [22, 46]. Например, тренд IC отражает подъем ГК из низов коры и его стабилизацию в средней ее части [42]. Между тем, в пределах одного комплекса можно обнаружить как DC, так и IC тренды [31, 35], что противоречит любой плейт-тектонической модели.

Идея гравитационного перераспределения [31, 8] кристаллических пород, приводящего к выводу на поверхность нижней части континентальной коры, позволила объяснить целый ряд наблюдаемых в природе явлений, включая совмещение IC и DC трендов в одном ГК. Движущая сила – гравитация, а механизм аналогичен подъему гранитных магм в ГЗП [24] и солевых диапиров [13]. "Спусковой крючок" – глубинный флюидно-тепловой поток (плюм). Становление метаморфических комплексов по этому механизму приводит к поддвигу (проградный метаморфизм) контактовых пород ГЗП под "всплывающие" (ретроградный метаморфизм) менее плотные породы ГК (см. разрезы на рис. 1). В настоящее время Р-Т тренды остывания и перемещения пород по такому механизму достаточно полно исследованы методами численного моделирования [18, 19].

Предложенная нами модель основывается на изначальной гравитационной нестабильности разрезов континентальной коры большинства докембрийских кратонов, обусловленной ритмичностью свит основных и ультраосновных пород в верхних и средних частях геологических разрезов ГЗП [31, 8]. В случае значительного снижения вязкости пород нижней части коры при ее прогреве под воздействием плюма до условий гранулитовой фации метаморфизма гравитационная нестабильность может привести сначала к выплыванию гранитов, а затем к всплыванию остаточного от плавления нижнекорового вещества, т.е. ГК. Эта модель автоматически решает рассмотренные проблемы, связанные с эрозией, поскольку предполагает синхронное подъему гранулитового диапира погружение пород кратона при относительно постоянстве мощности континентальной коры. Причем ритмичное переслаивание пород разной реологии способствует лавинообразному увеличению скорости гравитационного перераспределения за счет механизма цепной реакции [8, 40].

Для проверки модели гравитационного перераспределения первостепенное значение приобретает причинная связь и взаимодействие гранулитов с ГЗП. Как отмечалось выше, геологические взаимоотношения между этими комплексами изучены очень слабо, в том числе из-за крайне редких находок прямых контактов между ними. Однако буквально в последние годы исследования оживились, появилась возможность всесторонне протестировать модель гравитационного перераспределения на примере гранулитов и примыкающих

к ним ГЗП. Исследования проводились в ряде регионов (Юго-западное Прибайкалье, Алданский щит, Енисейский кряж, Карелия, Кольский п-в, Южная Африка), где хорошо вскрыты контакты ГК и сопряженных с ними ГЗП [31, 38, 29, 40, 41, 48, 44]. Во всех этих регионах получены сходные результаты. Тестирование модели мы продемонстрируем на двух парных поясах (рис. 1): Лапландский ГК + Карельский крaton (Кольский п-ов) и ГК Лимпопо + крaton Каапвааль (ЮАР).

### 1. Структурно-геологический тест

Геологическое картирование и детальное изучение зон сочленения ГК с ГЗП указывает на сопряженное формирование главных структурных элементов, линейность и ориентированные плоскостные элементы структуры – сланцеватость, гнейсовидность, полосчатость и т. п. (фолиация). Линейность, равно как и оси складок, отражает направление транспорта вещества, тогда как фолиация определяет ориентировку главных структурных элементов в пространстве. Установлено, что в случае относительно пологих тектони-

ческих контактов транспорт пород ГЗП осуществляется под надвигающиеся на них ГК. Это видно на рис. 1, где ГК и ГЗП разделены ширзонами регионального масштаба. Они возникают синхронно с купольными складками в гнейсах и мигматитах при  $P=5-7$  кбар, т.е. в средней части докембрийской коры при  $600-700^{\circ}\text{C}$ . Широкая распространенность складчатых дислокаций свидетельствует о снижении вязкости пород при этих параметрах и способности их к течению. Ясно, что в этом случае в породах сохраняется гидростатически равновесное давление.

Процесс всплывания и становления ГК контролируется не только ширзонами, отделяющими эти комплексы от ГЗП. Целые системы зон пластических деформаций закартированы и в самих гранулитях. На различных этапах формирования этих зон в ГК Лимпопо (рис. 1, а) они представлены сдвиговыми гнейсами ("straight gneisses") [43, 44]. Аналогичные соотношения характерны и для Лапландского ГК [39].

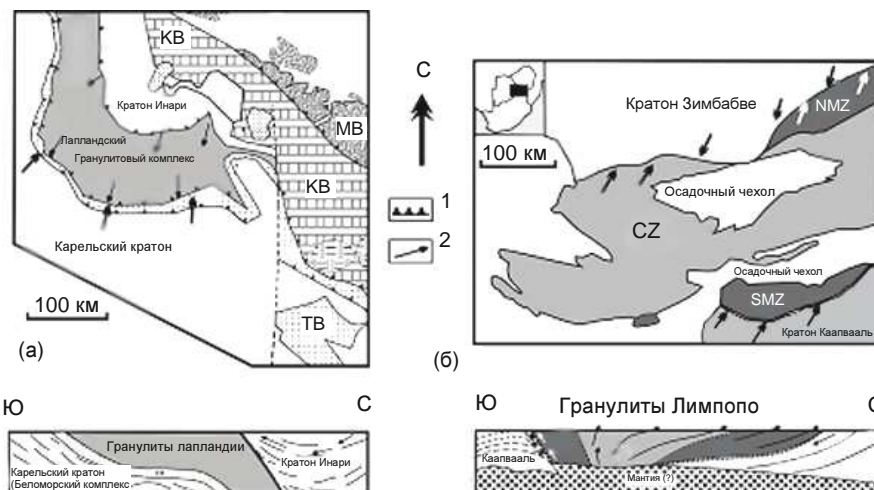


Рис. 1. Геологическая позиция и разрезы через гранулитовые комплексы Лапландии (а) и Лимпопо (б) [36].

Разрезы представляют собой геологическую интерпретацию геофизических данных по Лапландскому региону [12] и району Лимпопо [17]: 1 – падение пород в ширзонах, которые отделяют гранулиты от вмещающих их кратонов; 2 – направление транспорта пород, выявленное по линейности минералов [38, 25]; условные обозначения на рис. 6: Z – Зимбабве; В – Ботсвана, SA – Южная Африка; CZ – Северная Краевая Зона Центральной Зоны, SMZ – Южная Краевая Зона, HRSZ – Хоут Ривер ширзона

### 2. Литологический и геохимический тест

Геохимическое и литологическое сходство гранулитов и пород ГЗП известно давно [11, 47, 4, 48]. Установлено одинаковое распределение редких земель и изотопов Pb и U в породах ГЗП Каапвааль, в гранулитах и прорывающих их гранитоидах Южной зоны ГК Лимпопо [23]. Поразительно сходство валовых составов джеспилитов кртона Каапвааль и эвлизитов Лимпопо. Известно и сходство составов Лапландского ГК с породами Беломорского комплекса (рис. 1, а) [4]. Это предполагает, что протолитом для ГК был ГЗП. Вместе с тем, как на Кольском полуострове, так и в ЮАР отсутствуют осадочные толщи, которые должны возникнуть при эрозии ГК в том случае, если ей предшествовало горообразование (результат коллизии). Но в ЮАР субвулканические дайки (~2,6 млрд лет) прорывают ГК Лимпопо [35], свидетельствуя о выходе гранулитов (см. табл. 1) на поверхность. Отсутствие осадков и эти дайки – доказательство плоского рельефа в архейском ГК Лимпопо.

### 3. Геохронологический тест

Механизм гравитационного перераспределения предполагает более молодой по сравнению с кртоном

возраст метаморфизма пород ГК. Однако сформированные в нижней части коры горячие гранулиты движутся вверх синхронно с погружением пород кртона, непосредственно примыкающих к ГК. Это определяет метаморфизм пород ГЗП в ширзонах, синхронный возрасту ГК. Из теории динамики пластичной среды следует [40], что поднимающиеся к земной поверхности менее плотные гранулиты вызывают встречное течение примыкающих пород кртона, которые подвергаются метаморфизму в условиях амфиболитовой фации. Наиболее пластичные из них (например, слюдястые сланцы) попадают во встречный поток и поднимаются вместе с ГК. Если это так, то возраст их диафореза должен быть близок к возрасту гранулитов. U-Pb датировки подтверждают это явление в обоих тестируемых комплексах (таблица). А недавно такие же сведения опубликованы по 59 ГК-ГЗП парным поясам [3]. Отсюда следует правило: *гранулитовые комплексы всегда моложе вмещающих их кртонов и đồngовозрастны с породами разделяющих их ширзон.*

U-Pb изотопный возраст гранулитов и пород из зон интенсивных пластических деформаций (ширзон), отделяющих гранулитовые комплексы от кратонов

Порода	Зона/комплекс	10 <sup>9</sup> лет	Ссылка
<b>Балтийский щит (Россия, Финляндия)</b>			
Кианитосодержащий слюдястый сланец	Западная часть пояса Тана (Финляндия)	1,9	[16]
Кианитосодержащий слюдястый сланец	Корва – тндровая серия пояса Тана (Россия)	1,91	[2]
Амфиболит (Lap-34)	Кандалакшская серия пояса Тана	1,91	[32, 37]
Гиперстен-биотитовый плагиогнейс (Lap-9)	Падос – южная часть Лапландского гранулитового комплекса	1,91	
Гранулитовый гнейс	Тупая Губа – южная часть Лапландского гранулитового комплекса	1,916	[1]
Гнейсы, тоналиты	Карельский кратон (Беломорицы)	2,9-2,7	[4]
<b>Район Лимпопо (ЮАР)</b>			
Кианитосодержащий сланец	Shear zone Хоут Ривер, контакт кратона Каапвааль с гранулитами комплекса Лимпопо	2,689	[23]
Гранулит (метапелит)	Южная Краевая Зона (ЮКЗ) гранулитового комплекса Лимпопо	2,691	
Чарно-эндербит	Массив Маток в ЮКЗ гранулитового комплекса Лимпопо	2,671	[15]
Метавулканыты	Кратон Каапвааль	2,75-3,54	[17]

Таким образом, геохимические, геохронологические и структурно-геологические исследования выявили интенсивное тектоническое и термальное воздействие относительно молодых гранулитов на сопряженные с ними более древние породы ГЗП. Это воздействие (метаморфизм) синхронно процессу всплывания ГК, сопровождающееся надвиганием разогретых пород ГК на относительно холодные породы кратонов.

#### 4. Петрологический тест

Рассмотрим два важных для теста модели аспекта: i) вариации условий метаморфизма в пределах одного отдельно взятого ГК и ii) условия формирования прилегающего ГЗП. Важную роль при этом играют реакционные структуры пород и зональность минералов.

а) Метаморфизм в пределах ГК отличается существенной латеральной неоднородностью. Она проявляется как в распределении минеральных ассоциаций при однородном валовом составе пород, так и в химизме породообразующих минералов. Она связана с синхронным противоположенным перемещением ГК и прилегающих к ним пород ГЗП. Для метабазитов из ГК обычны реакционные структуры *разуплотнения*. Часто они представлены каймами Pl вокруг зерен Grt, а в метапелитах – реакциями  $2\text{Grt} + 4\text{Sil} + 5\text{Qtz} \Rightarrow 3\text{Crd}$ ,  $2\text{Grt} + 3\text{Qtz} \Rightarrow 4\text{Orx} + \text{Crd}$  и  $\text{Grs} + 2\text{Sil} + \text{Qtz} \Rightarrow 3\text{An}$ . Структуры *уплотнения* давно известны в метабазитах, а сравнительно недавно обнаружены и в метапелитах [31, 41]. Их размеры не превышают первых сотен микрон. Наиболее характерен рост идиоморфного, реже скелетного Grt с игольчатым агрегатом Sil и Qtz за счет Crd по реакции  $3\text{Crd} \Rightarrow 2\text{Grt} + 4\text{Sil} + 5\text{Qtz}$  (рис.2). Иногда встречаются структуры уплотнения, возникшие в ходе реакций  $4\text{Orx} + \text{Crd} \Rightarrow 2\text{Grt} + 3\text{Qtz}$ ,  $3\text{An} \Rightarrow \text{Grs} + 2\text{Sil} + \text{Qtz}$ ,  $\text{Spl} +$

$\text{Crd} \Rightarrow \text{Grt} + 2\text{Sil}$ ,  $\text{Crd} \Rightarrow 2\text{Spl} + 5\text{Qtz}$  [35]. В метапелитах структуры уплотнения часто наложены на структуры разуплотнения. Структуры *гидратации* минералов проявлены во всех ГК. Обычны такие реакции:  $\text{Orx} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Bt} + \text{Qtz} \pm \text{Sil}$ ,  $\text{Orx} + \text{Kfs} + \text{Sil} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Bt} + \text{Crd}$ ,  $\text{Kfs} + \text{Grt} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Bt} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ ,  $\text{Cpx} + \text{Pl} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Hbl}$ ,  $\text{Orx} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Cum}$ . Часто породы с такими структурами встречаются вблизи контактов с ГЗП. Структуры *дегидратации* минералов в гранулитах встречаются относительно редко и выражены в разложении Bt и Hbl с образованием безводных фаз, прежде всего Orx. Особенно часто эти структуры проявлены при чарнокитизации, протекающей [6, 41] на ретроградной стадии метаморфизма гранулитов [8, 33].

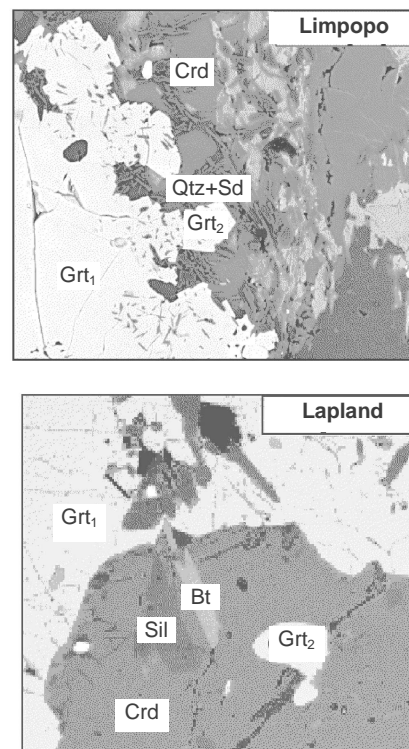


Рис. 2. Примеры реакционных структур уплотнения в гранулитах Лапландии и Лимпопо. Видно замещение кордиерита сростками граната силлиманита и кварца по реакции  $\text{Crd} = \text{Grt} + \text{Sil} + \text{Qtz}$

ii) Минералогические и петрографические особенности пород ГЗП в экзоконтакте ГК выражены в возникновении специфической метаморфической зональности как продукта погружения этих пород под надвигающиеся горячие гранулиты. Микроструктуры в *слюдястых сланцах* из ширзон, непосредственно примыкающих к контактам с гранулитами, в разной степени деформированы [38] – от высоких степеней деформации (с зародышами порфиروبластов Grt), до практически недеформированных сланцев с идиоморфными кристаллами Grt, Ku, иногда St [41]. На рис. 3 приведен пример последовательного развития порфиروبластов Grt – от зародышевой структуры (фото а), через структуру "снежного кома" (фото б), до свободного от минеральных включений идиоморфного Grt (фото в). Морфология Grt прекрасно согласуется с его химической зональностью. Это видно на взаимно перпендикулярных профилях поперек Grt, возникшего на разных стадиях. На стадии (рис. 3, а) ядро Grt обеднено Mg, но богато Mn. На стадии б (рис. 3) эта химическая зональность редуцируется, а  $X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  поперек "снежного кома" практически постоянна. Идиоморфный, Grt (рис. 3, в) имеет типичную для регрессивной стадии метаморфизма

зональность:  $X_{Mg}$  снижается к краям кристалла, а  $X_{Mn}$  возрастает. Так что по морфологии химической зональности Grt следует, что слюдяные сланцы испытали проградный метаморфизм, а затем, достигнув пика P-T параметров, подверглись ретроградному изменению. Комплементарно

снижается и степень деформированности слюдяных сланцев, то есть на стадии эксгумации ГК эти породы в ширзонах сначала погружались и нагревались, а затем поднимались и вновь остывали.

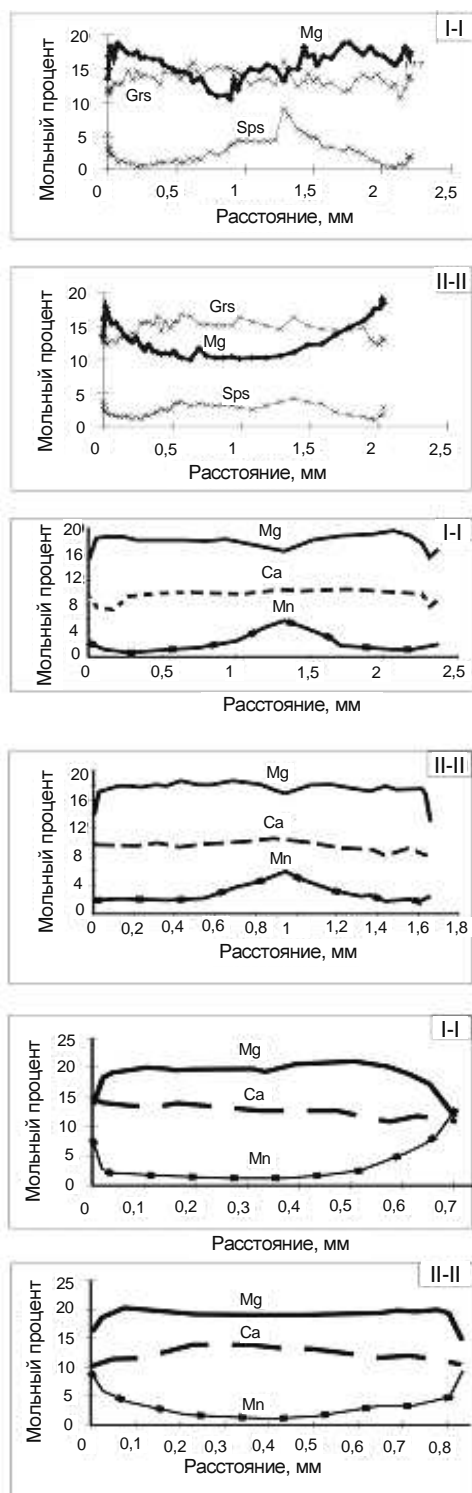
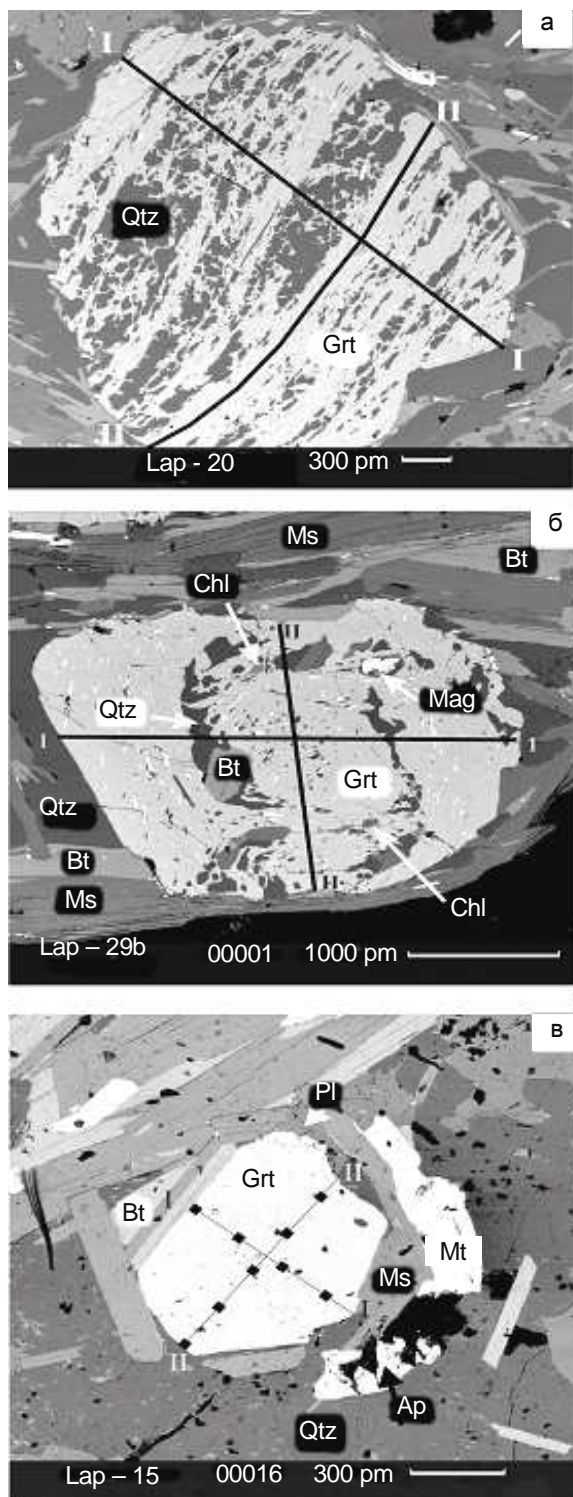


Рис. 3. Микроструктуры сланцев пояса Тана (Лапландия), отличающиеся морфологией и химической зональностью порфиробластов граната на стадиях погружения (а), пика метаморфизма (б) и возвращения пород в сторону поверхности (в). На химических профилях мольный процент Mg обозначает  $N_{Mg} = 100 \cdot (Mg / (Mg + F))$

### 5. Термодинамический тест (P-T тренды)

P-T тренды – единственный способ определения скоростей и механизмов перемещения пород в земной коре [7, 8, 46]. Считается [22], что на основании конфи-

гурации P-T трендов ГК разделяются на два геодинамических типа: тренды декомпрессионного остывания (DC) и тренды субизобарического остывания (IC). Тренды DC отражают механизм эксгумации пород путем



растяжения толстой коры за счет интенсивного магматизма, тогда как тренды ІС отражают относительно быстрое охлаждение ГК в средней части коры на постколлизийном этапе её эволюции. Формула "один комплекс = один Р-Т тренд" на долгие годы загрозила метаморфическим геологам и тектоникам, строившим свои геодинамические представления на модели широкого проявления процессов континентальной коллизии в докембрии. Вместе с тем практически все коллизийные модели рассматривают эксгумацию гранулитов в отрыве от вмещающих их пород. Докембрийские ГК залегают среди пород ГЗП. Следовательно, необходимо расшифровать синхронную "запись" Р-Т трендов метаморфизма для этих "парных поясов" и уж затем делать геодинамические выводы.

В верхних частях рис. 4 приведены Р-Т тренды ретроградного метаморфизма ГК Лапландии и Лимпопо. Впервые удалось установить, что в породах многих ГК записаны оба типа трендов, DC и ІС. Для каждого из них характерны вполне определенные реакционные структуры – разуплотнения для случая DC и уплотнения (рис. 2) для случая ІС. Причем ІС тренды не характерны для пород, удаленных от контактов с кратонами. Приуроченность трендов ІС к эндоконтактовым зонам ГК Лимпопо объяснялась так [35, с. 640]: "два типа Р-Т трендов отражают различную термодинамическую эволюцию блоков пояса Лимпопо при их внедрении в кору. Одни из них медленно воздымались в условиях нормального геотермического градиента. Другие же, достигнув глубин порядка 13–15 км, быстро остывали благодаря большому температурному градиенту между гранулитами и холодными породами зеленокаменного пояса". Иными словами, сочетание двух типов трендов в породах одного ГК свидетельствует о разнотипности движения блоков по схеме: быстрый подъем + медленное остывание и медленный подъем + быстрое остывание. В дальнейшем такой механизм был подтвержден численным моделированием Р-Т трендов [18, 19].

На одинаковом уровне глубинности породы кратона холоднее, чем гранулиты. Отток тепла от последних в сторону контакта приводит к нагреванию и дегидратации вмещающих пород в ходе эксгумации ГК. В ширзонах возникает неизобарическая метаморфическая зональность [38]. Она достигает  $T_{max}$  у контакта с ГК. Вместе с тем, из анализа морфологии порфириобластов Grt и их химической зональности было предсказано прохождение слюдястых сланцев через пик Р-Т параметров метаморфизма. Это значит, что на Р-Т диаграмме должна существовать петля. Действительно, такие петли выявлены для слюдястых сланцев из ширзон обоих тестируемых комплексов (рис. 4). Как правило, эти Р-Т петли направлены по часовой стрелке (clock-wise) и исключительно узки, т. е. намечается близость Р-Т режима прогрессивного и ретроградного метаморфизма.

С точки зрения тестируемой модели исключительно важно убедиться не только в одинаковом возрасте гранулитов и примыкающих к ним слюдястых сланцев (табл. 1), но и доказать синхронность подъема гранулитов и погружения сланцев. Это значит, что перемещения пород в земной коре должны быть согласованы в Р-Т координатах: минимуму тренда гранулитов должен соответствовать пик метаморфизма сопряженных слюдястых сланцев. Диаграммы на рис. 4 однозначно подтверждают этот вывод. Ни одна из коллизийных моделей не в состоянии объяснить синхронное погружение слюдястых сланцев в зонах контактов с ГК на глубину порядка 20–25 км и их достаточно быстрый подъем к поверхности.

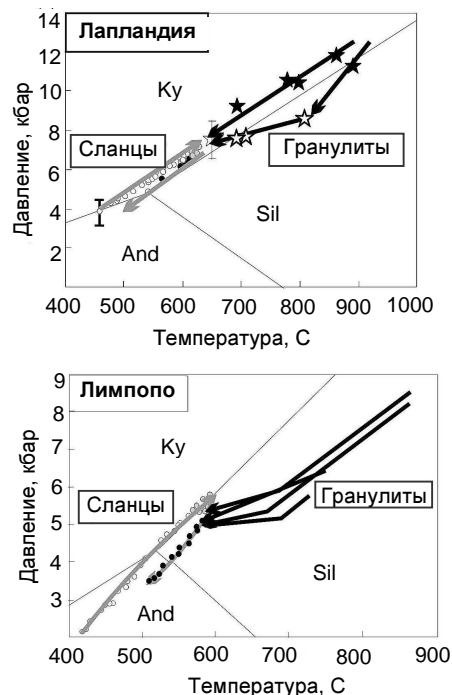


Рис. 4. Р-Т тренды пород гранулитовых комплексов Лимпопо и Лапландии и сопряженных пород зеленокаменных поясов, выведенные по результатам геотермобарометрии

#### 6. Флюидный режим всплывания гранулитов

Спускосым крючком начала всплывания гранулитового диапира может явиться приток горячего флюида из мантии. По данным о составе флюидных он состоит в основном из разогретой (до ~850°C)  $CO_2$  с небольшим содержанием  $H_2O$ . Поэтому оценка активностей  $H_2O$  и  $CO_2$  в метаморфическом флюиде, связанном с регрессивным этапом метаморфизма гранулитов, проводилась нами неоднократно [7, 9, 30, 31, 41]. Для ее расчета обычно используется равновесие  $Grt + Fsp + H_2O = Bt + Sil + Qtz$  в метапелитах. Расчеты показали, что  $a_{H_2O}^{fl}$  изменяется в пределах 0,05–0,4 ( $x_{H_2O}^{fl}=0,02–0,18$ ), что совпадает с оценками концентрации  $H_2O$  во флюидных включениях из гранулитов.

Интенсивный отток тепла через зону контакта хорошо объясняет наличие ІС этапа во внешних частях ГК, а возрастание Т при погружении пород ГЗП под ГК вдоль ШЗ должно приводить к дегидратации минералов и высвобождению воды. Эта вода, равно как и глубинный флюидный поток, устремляется вверх и производит гидратацию гранулитов по той же схеме, что и вода, освобождающаяся при дегидратации серпентина в зонах субдукции. Так, например, в краевых зонах ГК нередко широко развита куммингтонизация Орх и Crd [47].

#### 7. Численный тест

Обоснованность рассматриваемой модели подтверждена и результатами двумерного численного моделирования для случая ритмично слоистых разрезов с высоким контрастом плотностей и вязкостей пород [18, 19]. Более того, смоделирована не только эксгумация ГК в ходе гравитационного перераспределения, но и связанные с ней Р-Т петли для ширзон. На рис. 5 воспроизведены временные срезы всплывания ГК и сопряженного погружения ГЗП. Подъем и становление ГК в виде гарполита (см. разрезы на рис. 1) происходит за 8–10 млн лет, что соответствует скорости около 30–35 мм/год. На рис. 5 показано движение двух фрагментов (маркеров) гранулита, воспроизводящих DC и ІС тренды.

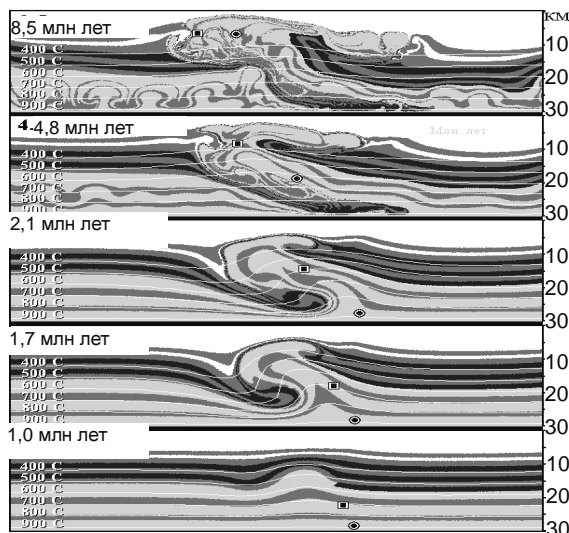


Рис. 5. Результаты численного моделирования движения двух образцов (маркеры) гранулит в термальном поле поднимающегося диапира

Отдельные кадры представляют 30х30 км секции 100х30 км модели. Цифрами показаны изотермы в °С. Маркеры отвечают двум различным типам Р-Т трендов пород (рис. 4): круглый маркер – образец гранулит, движущийся вдоль тренда декомпрессионного остывания (DC), а квадратный маркер – образец, движущийся вдоль тренда с участком изобарического остывания (IC).

#### 8. Геофизический тест

Механизм гравитационного перераспределения пород в архейской коре предполагает почти постоянную мощность земной коры и отсутствие видимых границ под ГК в литосферной мантии. Недавние исследования (метод сейсмической томографии) глубинного строения кратонов Каапваал и Зимбабве, между которыми залегает ГК Лимпопо, не обнаружили такую границу [21]. Это позволило заключить, что гранулитовый комплекс Лимпопо – образование внутрикратонное, а не межкратонное [21].

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 02-05-64025 и 03-05-64633) и гранта Президента РФ 1645.2003.5 "Ведущие научные школы России" (руководитель Л.Л.Перчук).

1. Бибикова Е.В., Мельников В.Ф., Авакян К.Х. Лапландские гранулиты: петрология, геохимия и изотопный возраст // Петрология. – 1993. – Т. 1. – № 2. – С.215-234. 2. Володичев О.И. Беломорский комплекс Карелии (геология и петрология). – Л., 1990. 3. Кожевников В.Н., Светов С.А. Мантийные и коровые термальные аномалии в архее и раннем протерозое: региональный анализ, глобальные корреляции, металлогенетические следствия / Геология и полезные ископаемые Карелии (ред. А.И.Голубев). – Петрозаводск, 2001. – С.3-17. 4. Козлов Н.Е., Иванов А.А., Нерович Л.И. Лапландский гранулитовый пояс – первичная природа и развитие. – Апатиты, 1990. 5. Корешкова М.Ю., Левский Л.К., Иванников В.В. Петрология нижнекоровых ксенолитов из даек и трубок взрыва Кандакшского грабена // Петрология. – 2001. – № 10. – С. 89-106. 6. Коржинский Д.С. Роль щелочности в образовании чарнокитовых гнейсов // Геология и петрология докембрия. Общие и региональные проблемы СО АН СССР: Тр. Вост.-Сиб. геол. ин-та. – М., 1962. – Вып. 5. Сер. Геология. – С.50-61. 7. Перчук Л.Л. Термодинамический режим глубинного петрогенеза. – М., 1973. 8. Перчук Л.Л. Магматизм, метаморфизм и геодинамика (Magmatism, metamorphism and geodynamics). – М., 1993. 9. Перчук Л.Л., Геры Т.В. Исследование некоторых петрологических процессов в литосфере // Эксперим. моделирование процессов минералообразования. – М., 1998. – С.410-424. 10. Перчук Л.Л., Носырев И.В., Кадушин В.Н. Геодинамическая модель кратонизации зеленокаменных поясов: зеленокаменные пояса и гранулиты // Критерии поисков и перспективы промышленной золотоносности Украины. – К., 1993. – С.15-38. 11. Петрова З.И., Левицкий В.И. Основные кристаллические сланцы в гранулитогнейсовых комплексах Сибирской платформы и их первичная природа // Геохимия вулканитов различных геодинамических обстановок / Ред. Л.В.Тайсон. –

Новосибирск, 1986. – С.17-34. 12. Пожиленко В.И., Смолкин В.Ф., Шаров Н.В. Сейсмологические модели земной коры Лапландско-Печенгского района // Сейсмологическая модель литосферы Северной Европы: Лапландско-Печенгский район / Ред. Н.В.Шаров. – Апатиты, 1997. – С.181-208. 13. Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. – М., 1985. 14. Спеццус З.В., Серенко В.П. Состав континентальной верхней мантии и низов коры Сибирской платформы. – М., 1990. 15. Barton J.M., van Reenen D.D. The significance of Rb-Sr ages of biotite and phlogopite for the thermal history of the Central and SMZs of the Limpopo Belt of southern Africa and the adjacent portions of the KVC // Precambrian Research. – 1992. – V.55. – №1-4. – P.17-31. 16. Bernard-Griffiths J., Peucat J.J., Postaire B. et al. Isotopic data (U-Pb, Rb-Sr, Pb-Pb and Sm-Nd) on mafic granulites from Finnish Lapland // Precambrian Research. – 1984. – V.23. – P.225-348. 17. de Wit M.J., Roering C., Hart R.J. et al. Formation of an Archean continent // Nature. – 1992. – V.357. – P.553-562. 18. Gerya T. V., Perchuk L. L., van Reenen D. D., Smit C. A. Two-dimensional numerical modeling of pressure-temperature-time paths for the exhumation of some granulite facies terranes in the Precambrian // J. Geodynamics. – 2000. – V. 30. – № 1-2. – P.17-35. 19. Gerya T.V., Perchuk L.L., Maresch W.V., Willner A.P., Van Reenen D.D., Smit C.A. Thermal regime and gravitational instability of multi-layered continental crust: implications for the buoyant exhumation of high-grade metamorphic rocks // European Journal of Mineralogy. – 2002. – V.14. – P.687-699. 20. England P.C., Thompson A.B. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism: I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust // J. Petrology. – 1984. – V.25. – № 4. – P.894-928. 21. James D.E., Fouch M.J., VanDecar J.C., van der Lee, and Kaapvaal Seismic Group. Tectonospheric structure beneath southern Africa // Geophys. Research Letters. – 2001. – 28. – № 13. – P.2485-2488. 22. Harley S.L. The origin of granulites: a metamorphic perspective // Geological Magazine. – 1989. – V.126. – P.215-231. 23. Kreissig K., Nögler T.F., Kramers J.D., Van Reenen D.D., and Smit A.S. An isotopic and geochemical study of the northern Kaapvaal craton and the Southern Marginal Zone of the Limpopo Belt: are they juxtaposed terranes? Lithos. – 2000. – V.50. – P.1-25. 24. Macgregor A.M. Some milestones in the Precambrian of Southern Rhodesia // Transactions of Geological Society of South Africa. – 1951. – V.54. – С.27-71. 25. Marker M. Early Proterozoic thrusting of the Lapland granulite belt and its geotectonic evolution, northern Baltic Shield // Geol. Foren. Stockh. Forh. – 1988. – V.11. – P.405-441. 26. Mason, R. The Limpopo Mobile Belt – Southern Africa // Philos. Trans. R. Soc. – London, 1973. – V.A273. – P.463-485. 27. Perchuk L.L. Gas-mineral equilibria and possible geochemical model of the Earth's Interior // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1976. – V.13. – P.232-239. 28. Perchuk L.L. Thermodynamic control of metamorphic processes // Energetics of Geological Processes (Ed. S.K.Saxena and S.Bhattacharji). N.Y.: Springer Verlag, 1977. P.285-352. 29. Perchuk L.L. Metamorphic evolution of shields and fold-belts // Geologica Carpathica. 1985. V. 36, No 2, P. 179-189. 30. Perchuk L.L. The course of metamorphism // Intern. Geol. Review. – 1987. – V.28. – P.1377-1400. 31. Perchuk L.L. P-T fluid regimes of metamorphism and related magmatism with specific reference to the Baikal Lake granulites // Evolution of Metamorphic belts (Eds S.Daly, D.W.D. Yardley and B.Cliff) Geological. Society of London: Special Publication. – 1989. – V.42. – P.275-291. 32. Perchuk L.L., Gerya T.V., van Reenen D.D., Smit C.A. Formation and dynamics of granulite complexes within cratons // Gondwana Research. – 2001. – V.4. – № 4. – P.729-732. 33. Perchuk L.L., Gerya T.V. Fluid control of charnockitization // Chemical Geology. – 1993. – V.108. – № 1-4. – P.175-186. 34. Perchuk L.L., Gerya T.V., Van Reenen D.D., Smit C.A. Cratonization: from greenstone belts to granulites // EUG 9. – 1997. Abstract Supplement № 1. Terra Nova. V.9. – P.362. 35. Perchuk L.L., Gerya T.V., van Reenen D.D., Safonov O.G., Smit, C.A. The Limpopo metamorphic complex, South Africa: 2. Decompression and cooling regimes of granulites and adjacent rocks of the Kaapvaal craton // Petrology. – 1996. – V.4. – P.571-599. 36. Perchuk L.L., Gerya T.V., van Reenen, O.G., Krotov, D.D., Safonov, A.V., Smit, C.A., Shur M.Yu. Comparable petrology and metamorphic evolution of the Limpopo (South Africa) and Lapland (Fennoscandia) high-grade terranes // Mineralogy and Petrology. – 2000. – V.69. – P.69-107. 37. Perchuk L.L., Gerya T.V., van Reenen D.D., Smit C.A. Formation and dynamics of granulite complexes within cratons // Gondwana Research. – 2001. – V.4. – № 4. – P.729-732. 38. Perchuk L.L., Krotov A.V. Petrology of the mica schists of the Tanael belt in the southern tectonic framing of the Lapland granulite complex // Petrology. – 1998. – V.6. – № 2. – P.149-179. 39. Perchuk, L. L., Krotov A.V., Gerya, T.V. Petrology of amphibolites of the Tanael Belt and granulites of the Lapland complex // Petrology. – 1999. – V.7. – № 4. – P.539-563. 40. Perchuk L.L., Podladchikov Yu.Yu., Polyakov A.N. Geodynamic modeling of some metamorphic processes // Journal of Metamorphic Geology. – 1992. – V.10. – P.311-318. 41. Perchuk L.L., Safonov O.G., Gerya, T.V., Fu B., Harlov D.E. Mobility of components in metasomatic transformation and partial melting of gneisses: an example from Sri Lanka // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2000. – V.140. – P.12-232. 42. Sandiford M., Powell R. Deep crustal metamorphism during continental extension: modern and ancient examples // Earth and Planet. Sci. Lett. – 1986. – V.79. – P.151-158. 43. Smit C.A., van Reenen D.D. Deep crustal shear zones, high-grade tectonites and associated alteration in the Limpopo belt, South Africa. implication for deep crustal processes // Journal of Geology. – 1997. – V.105. – P.37-57. 44. Smit C.A., van Reenen D.D., Gerya T.V., Perchuk L.L. P-T conditions of decompression of the Limpopo high grade terrane: record from shear zones // J. Metam. Geology. – 2001. – V.19. – P.249-268. 45. Spear F.S. Metamorphic

phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Washington, D.C.: Mineralogical Society of America Publication. – 1993. 46. *Thompson A.B.* Heat, fluids, and melting in the granulite facies / *Granulites and crustal evolution*. Kluwer. Dordrecht, 1990. – V.311. – P.37-58. 47. *van Reenen D.D.* Hydration of cordierite and hypersthene and a description of the retrograde orthoamphibole isograd in the Limpopo belt, South Africa // *Amer. Mineral.* –

1986. – V.71. – P.900-915. 48. *van Reenen D.D., Smit C.A.* The Limpopo metamorphic complex, South Africa: 1. Geological setting and relationships between the granulite complex and the Kaapvaal and Zimbabwe cratons // *Petrology.* – 1996. – V.4. – № 6. – P.562-570.

Надійшла до редколегії 10.12.2003 р.