

О. В. Усенко

## Коматииты Украинского щита

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Старостенко)

Ультраосновные вулканогенные породы образуются в результате подъема первичного расплава, сформированного на глубине более 250 км. В архее активны окисленные хлоридно-водно-силикатные флюиды. При их участии происходит образование коматиитов, слагающих зеленокаменные структуры Среднеприднепровского мегаблока. Породы Среднего Побужья образованы при участии щелочных фторидно-карбонатных флюидов, активных в палеопротерозое. Это не позволяет отнести их к коматиитовой формации.

**Ключевые слова:** архей, коматииты, зеленокаменные структуры, флюиды.

Долгое время единственными представителями мантийных расплавов считались базальты, температура которых на поверхности составляет 1200 °С. В 70-е годы М. и Р. Вильюнами были обнаружены коматииты — ультраосновные вулканогенные породы. Кристаллизация коматиитов начинается при 1450 °С. Этот факт объясняют либо повышенными температурами архейской мантии, либо плутоновой тектоникой — огромными глубинами зарождения, либо высокой степенью плавления, хотя для архея более подходит термин “низкая степень кристаллизации”. Существование ультраосновных расплавов отрицало наличие глобальной астеносферы на глубине около 100 км, предполагаемой в первой редакции тектоники плит. Предполагалось, что только 3,8–2,8 млрд лет назад имелись условия, обеспечивавшие вынесение глубинных магм к поверхности, так как механизм тектоники плит еще не действовал. Поэтому присутствие коматиитов являлось доказательством архейской кратонизации. Это геодинамический и хронологический аспекты термина.

До настоящего времени не стихают споры о петрологическом и геохимическом значении термина. Коматиит — вулканогенная порода, состоящая из серпентинизированного магнезиального оливина ( $fa$  до 10), кальциевого, часто хромистого пироксена, аортита и хромита. К коматиитам относят породы, в которых  $MgO > 18\%$ , низкое содержание кремнезема, глинозема, щелочей, титана и высокое — никеля, хрома, кобальта. Соотношение  $CaO/Al_2O_3 = 0,8–1,5$ . Часто, но не всегда, проявлены структуры “спенифекс”. Коматииты перемежаются с базальтами, но не имеют с ними взаимных переходов. Согласно этому описанию, разница между коматиитом и пикритом, представляется практически неуловимой.

Цель работы — не обоснование или опровержение глобальной геодинамической модели, а выяснение специфики обстановок в месте генерации и дифференциации архейских расплавов, образующих коматииты, а также выделение коматиитовой формации среди пород Украинского щита (УЩ).

Параметрами, отвечающими за состав пород на поверхности, являются  $PT$ -условия дифференциации, задаваемые размещением границы литосфера–астеносфера, и состав сопутствующего флюида. На кровле астеносферы протекает химическая и кристаллизационная дифференциация расплава, условия которой и определяют состав магматических пород, из него кристаллизующихся. При участии флюида образуются экскалиационно-осадочные слои, появление последних связано с разгрузкой гидротерм, имеющих эндогенные

источники тепла и вещества [1]. Поэтому состав всех пород формации указывает на особенности протекания геодинамического процесса, а также — состав глубинных флюидов. Генетическая связь всех пород “полициклического осадочно-вулканогенного комплекса” зеленокаменных структур (ЗКС) Среднеприднепровского мегаблока (СПМБ) УЩ, установленная И. Н. Бордуновым [2], — основа для поиска закономерностей в составе пород ЗКС. В этом комплексе коматиты всех без исключения ЗКС появляются синхронно и занимают определенное место, что является отражением единого геодинамического процесса [1].

Магматические породы каждого региона имеют свои особенности. Ультрабазиты Сурской и Верховцевской ЗКС СПМБ отличаются от коматитов мира широким развитием крайних членов ряда — серпентинитов, которые характеризуются крайне высокой магнезиальностью, крайне низкой глиноземистостью и кальциевостью. Коматитовая (базит-ультрабазитовая, дунит-гардбургитовая, серпентинитовая, по [2]) формация Сурской ЗКС включает наименее дифференцированные разности, которые отражают состав глубинного источника. Массовое содержание MgO равно 36–39%. Коматиты — это породы, почти нацело сложенные серпентином. Для образования подобного расплава необходимы переход в расплав не только пироксенов, но и оливина, что возможно при давлении более 7 ГПа, а затем беспрепятственная доставка этого расплава к поверхности. Очевидно, магма должна была быть существенно разбавлена флюидом. Только в архее на этой глубине существовал расплав, содержащий окисленный флюид, состоящий из кислорода, углерода и водорода, так как мантия не была полностью кристаллизована. Именно высокий окислительный потенциал на глубине существования первичного расплава и обеспечивал высокую магнезиальность вулканитов.

В результате подъема глубинного вещества происходило утонение литосферы. Основная часть расплава не достигала поверхности. Дифференциация протекала на глубине ~50 км, что приводило к кристаллизации оливина и пироксена. Расплав обогащался глиноземом, кальцием, натрием, при этом образовывались породы, содержащие плагиоклаз, кальциевые пироксены, которые в случае активности водного флюида с кремнеземом замещались актинолитом. Содержание MgO уменьшалось до 20%, CaO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> возрастало до 7%, тогда как содержание кремнезема оставалось прежним. Формировались актинолититы, хлорит-актинолит-тальковые с карбонатом породы. Максимально дифференцированные разности представлены альбит-хлорит-актинолитовыми сланцами, ассоциирующими с карбонатами и железисто-кремнистыми породами [1–4].

Все глубинные расплавы характеризуются высокой активностью кислорода. Вода и, по всей видимости, CO<sub>2</sub> образуются на меньших глубинах — 3 ГПа и 5–6 ГПа соответственно. Флюиды (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, HCl) выносились вместе с силикатным расплавом, поэтому формирование “вторичных” минералов совершалось вместо “первичных” непосредственно в процессе кристаллизации [1]. При высокой активности водного флюида оливин замещался серпентином, в присутствии CO<sub>2</sub> — тальком [1, 2]. В составе коматитов широко представлены хлоритоиды и амфиболы (актинолит и tremolit), замещающие пироксены и слюды в условиях крайне высокого окислительного потенциала, обеспечивающего активность магния, железа, кремнезема, инертность калия.

Очень высокие содержания MgO в ЗКС присущи не только силикатным, но и сопутствующим карбонатным породам. Карбонатные пласты представлены брейнеритом, реже — доломитом, кальций входит в состав силикатных пород. Смесимость силикатного расплава и карбонатного флюида указывает на присутствие воды и нейтрально-кислую среду на глубине дифференциации расплава — под корой.

Полезные ископаемые, связанные с коматиитами, — хромиты, железистые пласти, а также сульфидные месторождения никеля, кобальта, меди. Все эти металлы активны при высоком окислительном потенциале и в кислой среде. Железистые пласти относят к железисто-кремнисто-вулканогенной формации [3], типичной исключительно для архейских ЗКС. Ей присущи джеспилиты и роговики (джесперы) сложенные яшмой и железорудными прослойми. Последние представлены сидероплезитом и, уступающим ему по количеству, магнетитом.

Расплавы, обогащенные водно-силикатным флюидом с хлорид-ионами, попадали и в кору, что приводило к ее плавлению. Участие водных флюидов, обогащенных хлорид-ионами, ускоряло процесс, так как обеспечивало избирательное растворение минералов, перераспределение кремнезема, глинозема и натрия. В коре образовывались гранитные расплавы, из которых кристаллизовались кварц-плагиоклазовые породы. Они и окружают ЗКС. Их возраст тоже архейский — 2,8 млрд лет и более. Каждый этап образования коматиитов сопровождался формированием или поддержанием слоя плавления в коре [4].

Состав вулканогенных пород, расплавы которых дифференцированы в мантии и коре, их вторичные изменения, и связанные с ними полезные ископаемые определяются составом глубинных флюидов — окисленных хлоридно-водно-силикатных. Можно предположить, что их активность в архее связана с фазовым составом мантии. Самые древние ксенолиты, вынесенные кимберлитами на кратонах, имеют возраст 2,9 млрд лет [5]. До этого мощность литосферы изменялась от 50 до 150 км в геодинамическом процессе. Только после избавления мантийных глубин от избытка кислорода, кремнезема, глинозема, кальция, железа, натрия и хлора становится возможной кристаллизация недеплетированной мантии. То есть расплавы, из которых образуются коматииты — составная часть архейских гранит-зеленокаменных областей — хронологически и генетически связаны с формированием кристаллической мантии.

В связи с этим геодинамический и хронологический смысл, вкладываемый в термин, выступает на первый план. Так, согласно мнению И. Б. Щербакова, коматиит — термин формационно-геологического наполнения [6]. Коматииты присущи исключительно ЗКС. Условия, при которых они образованы, более никогда не повторялись в связи с направленным развитием глубинных оболочек Земли.

Теоретически после формирования архейские ЗКС могут быть погружены на глубину развития гранулитовой фации и преобразованы там, где геодинамический процесс продолжался, особенно на границах жестких блоков — в шовных зонах (ШЗ). Например, в Орехово-Павлоградской ШЗ находится Новогоровская ЗКС, породы которой метаморфизованы в амфиболитовой фации. Она бесспорно является продолжением Белозерской ЗКС.

Исторически сложилось, что Среднее Побужье (СП) принято считать самым древним регионом УЩ, поэтому широко представленные здесь ультрабазиты деренюхинского комплекса, в который входят дифференцированные пластовые залежи, многие авторы относили к коматиитам. На Демовяровском участке Молдовской структуры скважиной 1016А пройдены серпентинит-тремолитовая (3,6 м) и оливин-пироксен-актинолит-тремолитовая породы [7]. Мощность пироксенитового слоя, перемежающегося с базальтовым, около 70 м. Содержание  $MgO \sim 22\text{--}32\%$ ,  $FeOt \sim 10\%$ ,  $SiO_2 \sim 40\%$  соответствует коматитовым стандартам. Но оливин-хризолит, содержание железистого компонента в ортопироксене — 12%.

Инtrузивные массивы относят к капитанскому комплексу. В обоих комплексах преобладают серпентинизированные ультрамафиты, с интрузивами капитанского комплекса связаны месторождения хромитов. Это сближает их с коматитовой формацией. В дере-

нююхинском комплексе шире представлены габброиды (до 60%), а в капитанском — дуниты и перидотиты. Ультрамафиты капитанского комплекса характеризуются высокими содержаниями MgO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и низкими TiO<sub>2</sub>, CaO и FeOt. Хромиты из пород капитанского комплекса отличаются высокими содержаниями хрома, глинозема и магния, а в хромитах деренюхинского комплекса повышаются содержания TiO<sub>2</sub> и FeOt, при сокращении — MgO. Все вышеперечисленные признаки указывают на высокое давление, а также на крайне высокий окислительный потенциал в месте формирования первичных расплавов обоих комплексов — глубину зарождения первичного расплава более 250 км. Это объясняет высокие содержания MgO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Но в деренюхинском комплексе отмечается широкое развитие габброидов, расплавы которых могли появиться в результате дифференциации первичного расплава на глубине ~50 км. В них присутствуют железистый оливин, хромшпинелиды с повышенным содержанием железа и титана. Титан в архее пассивен, его низкие содержания — один из признаков пород ЗКС.

Существует целый ряд косвенных признаков, указывающих на иные условия образования пород СП, которые не позволяют относить их к архейским образованиям, а ультрабазиты — к коматиитам, присущим ЗКС.

Породы деренюхинского комплекса приурочены к структурам, сложенным породами бугской серии. Возраст бугской серии — палеопротерозойский: не ранее 2,5 и не позднее 1,95 млрд лет [8]. Возраст эвлизитов и мраморов с Завалье 1,91 и 2,0 млрд лет, а окружающих бердичевских гранитов 2,01–2,05 млрд лет.

Бердичевские граниты характеризуются наличием кордиерита, силлimanита, андалузита и графита. В них идиоморфные таблицы плагиоклаза погружены в мелкозернистую ткань, сложенную калиевым полевым шпатом, кварцем и биотитом. Палингенные гранитоиды, генетически связанные с коматиитами ЗКС, образованы до 2,8 млрд лет и не содержат калиевый полевой шпат. В архее калий инертен вследствие высокого окислительного потенциала расплавов и флюидов. Время наложения метаморфизма в СП — 1,925–1,967 млрд лет. Источником тепла и вещества для метаморфических преобразований служит слой плавления в коре, продуцирующий микроклиновые граниты. Даже учитывая точность определений абсолютного возраста ( $\pm 0,02$  млрд лет), мраморы и эвлизиты, генетически связанные с ультрабазитами, образованы после гранитизации.

Породы бугской серии совершенно отличны от пород ЗКС. Они представлены биотитовыми мигматитами и существенно глиноземистыми гнейсами: гранат-кордиерит-силлimanитовыми, биотит-плагиоклазовыми, графит-плагиоклазовыми, а также кварцитами, мраморами, кальцифирами, итабиритами, силлиманитовыми и графитовыми гнейсами. Основная масса ультрабазитов и железистых пород относится к верхней хашевато-завальевской свите. “Коматииты” Молдовской структуры залегают на биотит-графитовых гнейсах с прослойями кальцифиров.

Железистые породы СП относятся к железисто-кремнисто-карбонатной формации, которая по целому комплексу признаков совершенно отлична от железисто-кремнисто-вулканогенной формации ЗКС. В железисто-кремнисто-карбонатной формации на первом месте выступает гематит, содержание магнетита уменьшается, а среди карбонатов развиты доломит и анкерит [3]. Рудные пласты (карбонат- и силикат-магнетитовые) находятся внутри железисто-кремнистых пластов или кальцифиров. Кальцифиры Молдовского участка содержат 35% оливина, клинопироксен, флогопит. Силикаты, количество которых составляет более 15%, серпентинизированы. По трещинам развиты актинолит-тремолитовые амфиболы. Карбонаты представлены кальцитом и доломитом. Второстепенные минералы — апатит

и графит. Это типичные карбонатиты — породы образованные из карбонатных расплавов, возникающих при несмесимости силикатного расплава и карбонатного флюида в условиях высокой щелочности и недостатка кислорода. В щелочной среде углерод связывается не с кислородом, а с водородом. Образуется не вода, а углеводороды. Совокупность признаков указывает, что формирование экскальационно-осадочной толщи, генетически связанной с ультрабазитами, происходило при активности щелочных карбонатно-фторидно-натриевых флюидов. Их активность наблюдается после второго этапа гранитизации — после 2,0 млрд лет на всем УЩ.

Активность “сухих” карбонатных флюидов объясняет и тот факт, что гранитизация и метаморфизм предваряют формирование ультрабазитов. После их образования, сопровождавшегося утонением литосферы до 50 км, плавление в коровом интервале глубине не происходило. Создается впечатление, что появление ультрабазитов СП, связано с существованием зон, проникаемых для расплавов и флюидов, поступающих с глубин более 250 км. По этим зонам в палеопротерозое происходит вынесение железа, углерода, кислорода, что может быть связано с кристаллизацией нижней части верхней мантии и перераспределением железа и углерода между ядром, мантией и поверхностью.

Протекание геодинамического процесса (дифференциация глубинного расплава на глубине 50 км, при неоднократном поступлении расплава с глубины не менее 250 км под кору) сближают условия образования типичных коматитов СПМБ и ультрабазитов СП. Этот механизм объясняет высокий окислительный потенциал на глубине формирования первичных расплавов и появление недифференцированных разностей на поверхности. В фанерозое подобным образом формируются пикриты и меймечиты Сибирской трапповой провинции. Но в докембрии несколько этапов поступления глубинного вещества на глубину 50 км и к поверхности, встроены в продолжительный процесс, состоящий из 14–17 этапов [1]. В фанерозое для образования слоя плавления на глубине 250–410 км необходимо инициальное плавление, тогда как в архее астеносфера на глубинах более 150 км, а в протерозое — более 250 км существует изначально.

Таким образом, отмечается причина сходства архейских, протерозойских и фанерозойских ультраосновных вулканитов. Однако типичные коматиты образуются только в архее, в условиях избытка окисленных флюидов. В палеозое и фанерозое существенна доля щелочных карбонатных флюидов, что приводит в том числе и к сопряжению ультраосновных вулканитов и карбонатитов. Ультрабазиты СП относятся к совершенно иной формации, не связанной с формированием ЗКС и имеющей палеопротерозойский возраст.

## Цитированная литература

1. Усенко О. В. Условия формирования зеленокаменных структур Приднепровского блока Украинского щита // Геофиз. журн. – 2006. – **28**, № 6. – С. 74–93.
2. Ультрабазитовые формации центральной части Украинского щита / Под ред. Н. П. Семененко. – Киев: Наук. думка, 1979. – 412 с.
3. Железисто-кремнистые формации докембия европейской части СССР. Генезис железных руд / Отв. ред. В. М. Кравченко, Д. А. Кулик. – Киев: Наук. думка, 1991. – 216 с.
4. Усенко О. В. Условия формирования гранитоидов Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области // Геофиз. журн. – 2014. – **36**, № 2. – С. 57–74.
5. Pearson D. G., Canil D., Shirey S. B. Mantle Samples Included in Volcanic Rocks: Xenoliths and Diamonds. – The Mantle and Core / Ed. R. W. Carlson. – Oxford: ELSEVIER Ltd. – 2005. – P. 171–276.
6. Щербаков И. Б. Петрология Украинского щита. – Львов: ЗуКЦ, 2005. – 366 с.

7. Злобенко И. Ф., Каневский А. Я., Металиди С. В., Дусыцкий В. А., Лепигов Г. Д. Коматиты Среднего Побужья (Украинский щит) // Сов. геология. – 1983. – № 9. – С. 103–108.
8. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой / Под ред. Н. П. Щербака. – Киев: Наук. думка, 2008. – 240 с.

## References

1. Usenko O. V. Geofiz. J., 2006, **28**, No 6: 74–93 (in Russian).
2. Ultrabasic formations central part of the Ukrainian Shield. Ed. N. P. Semenenko. Kiev: Nauk. Dumka, 1979 (in Russian).
3. Ferruginous-siliceous formations of the Precambrian of the European part of the USSR. Ed. V. M. Kravchenko, D. A. Kulik, Kiev: Nauk. Dumka, 1991 (in Russian).
4. Usenko O. V. Geofiz. J., 2014, **36**, No 2: 57–74 (in Russian).
5. Pearson D. J., Canil D., Shirey S. B. Mantle Samples Included in Volcanic Rocks: Xenoliths and Diamonds. The Mantle and Core. Ed. R. W. Carlson Oxford: ELSEVIER Ltd., 2005.
6. Shcherbakov I. B. Petrology of the Ukrainian shield, Lvov: ZuKTS, 2005 (in Russian).
7. Zlobenko I. F., Kanevsky A. Y., Metalidi S. V., Dusyatsky V. A., Lepigov G. D. Sov. Geology, 1983, No 9: 103–108 (in Russian).
8. Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian shield. Archaea. Ed. N. P. Shcherbak, Kiev: Nauk. Dumka, 2005 (in Russian).

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна  
НАН України, Київ

Поступило в редакцію 01.04.2015

## О. В. Усенко

### Коматіїти Українського щита

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ

Ультраосновні вулканогенні породи утворюються внаслідок підйому первинного розпласу, що формується на глибині понад 250 км. В архей активними є окиснені хлоридно-водно-силікатні флюїди. За їхнього участю відбувається утворення коматіїтів, що складають зеленокам'яні структури Середньопридніпровського мегаблоку. Породи Середнього Побужжя утворено за участі лужного фторидно-карбонатного флюїду, який був активним в палеопротерозої. Це не дозволяє відносити їх до коматіїтової формациї.

**Ключові слова:** архей, коматіїти, зеленокам'яні структури, флюїди.

## O. V. Usenko

### Komatiites of the Ukrainian Shield

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kiev

*Ultramafic volcanic rocks are formed as a result of lifting the primary melt formed at a depth of 250 km. In the Archean, the oxidized chloride-water-silicate fluids were active. With their participation, komatiites were formed and compose the greenstone structure of the Srednepridneprovsky megablock. Igneous rocks of the Middle Bug were formed with the participation of the alkali fluoride carbonate fluids, active in the Paleoproterozoic. It is not possible to attribute them to the komatiitic formation.*

**Keywords:** Archaean komatiites, greenstone structure, fluids.