



УДК 551.242 (470.57)

# ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОХИМИИ И ИЗОТОПИИ УГЛЕРОДА ГРАФИТОВЫХ ЭКЛОГИТОВ МАКСЮТОВСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

С. Г. Ковалев, Е. А. Тимофеева

Институт геологии Уфимского научного центра РАН, Уфа  
kovalev@ufaras.ru

Приводятся первые данные по геохимии и изотопии углерода графитовых эклогитов максютовского метаморфического комплекса. Установлено, что графитовые эклогиты обогащены всей группой редкоземельных элементов при резком преобладании LREE. Кроме того, в них отмечаются высокие содержания U, Th, Sr, P и Nd. Изотопные характеристики углерода изменяются в пределах от  $-22.1$  до  $-25.0$  ‰, составляя в среднем  $-23.8$  ‰, что в целом близко к содержанию  $\delta^{13}\text{C}$  в графите, рассеянном в силикатной массе пород мантии. Делается вывод о том, что протолитами графитовых эклогитов указанного комплекса являлись либо углеродсодержащие магматические породы, либо мантийные эклогиты, тектонически внедренные в субстрат комплекса при взаимодействии субдуцирующей плиты с веществом верхней мантии.

Ключевые слова: максютовский комплекс, графитовые эклогиты, изотопы углерода, протолит, гранат, омфацит.

## THE FIRST TRACE ELEMENTS GEOCHEMISTRY AND CARBON ISOTOPE DATA OF THE GRAPHITE ECLOGITES OF THE MAKSYUTOV COMPLEX (SOUTHERN URALS MOUNTAINS)

S. G. Kovalev, E. A. Timofeeva

Institution of Russian Academy of Sciences Institute of geology of the Ufimian scientific centre

We present the first data on the geochemistry and isotopes of carbon graphite eclogite maksyutov metamorphic complex. Found that graphite eclogites are enriched as a group of rare earth elements with a sharp predominance of LREE. In addition, they have high content of U, Th, Sr, P and Nd. Carbon isotopic characteristics vary between  $-22.1$  to  $-25.0$  ‰, averaging  $-23.8$  ‰, which generally close to the  $\delta^{13}\text{C}$  content in graphite dispersed in the silicate mantle rock mass. It is concluded that the graphite eclogite protolith maksyutov metamorphic complex were either carbon-igneous rocks, or they are fragments of mantle eclogites, tectonically complex embedded in the substrate interaction subducting slab upper mantle.

Keywords: maksyutov complex, graphite eclogites, carbon isotopes, protolith, garnet, omphacite.

Эклогиты и эклогитоподобные породы, развитые в пределах метаморфических комплексов, имеют широкое географическое распространение. В России эти образования в основном сосредоточены в пределах Байкало-Муйского и Уральско-го складчатых поясов. Относительно хорошая геологическая изученность уральских объектов, и в частности максютовского метаморфического комплекса (ММК), выразившаяся в значительном количестве публикаций [1, 4, 6–15], тем не менее не решила целый ряд принципиальных проблем.

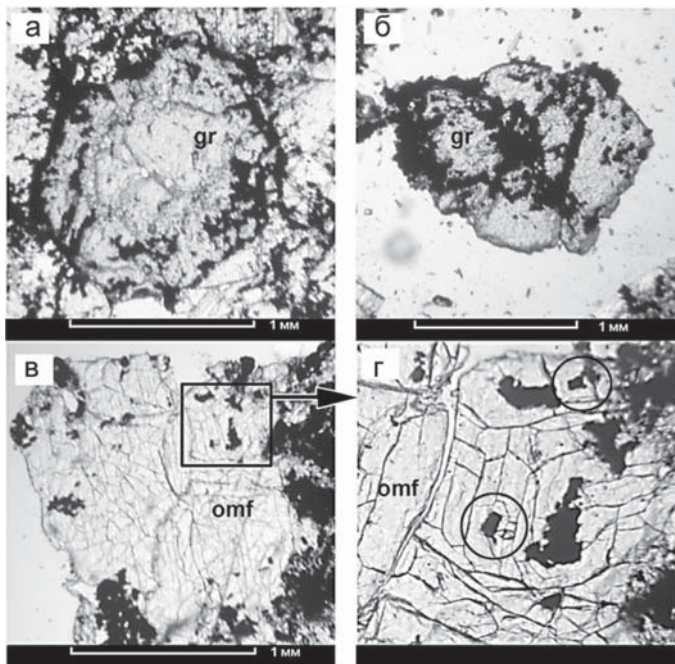
Одним из наиболее дискуссионных вопросов, нуждающихся в корректном решении, является проблема установления генетической при-

роды эклогитов и их протолитов. В настоящее время формирование эклогитов ММК объясняется изофациальным метаморфизмом магматических протолитов и вмещающих их осадочных или вулканогенно-осадочных толщ, тектоническим внедрением мантийных эклогитов или непосредственной кристаллизацией эклогитов из магматических расплавов.

Редкой разновидностью метаморфических пород ММК являются графитовые эклогиты, описанные А. А. Алексеевым [1] и нами [4], представляющие собой среднезернистые темно-серые породы с мелкими выделениями розового граната и шлировидными обособлениями зеленого омфацита. Для них

характерны порфиронематобластовая и пойкилобластовая структуры и массивная с элементами шлирово-такситовой текстура. Породообразующие минералы представлены: гранатом (10–20 %), омфацитом (60–70 %), графитом (14–18 %); акцессорные: кварцем (редко), апатитом (0.5 %) и сфеном (1.5 %).

Гранат ( $\text{SiO}_2$  — 35.8,  $\text{TiO}_2$  — 0.19,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 19.12,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 3,  $\text{FeO}$  — 21.9,  $\text{MnO}$  — 1.78,  $\text{MgO}$  — 2.95,  $\text{CaO}$  — 9.7,  $\text{Na}_2\text{O}$  — 0.06,  $\text{K}_2\text{O}$  — 0.02,  $\text{C}$  — 4.7, п.п.п. — 0.3, е — 99.52; вес. %) присутствует в идиоморфных кристаллах размером около 1 мм (реже до 1.5 мм). Он содержит включения графита (рис. 1, а, б), омфацита и кварца. В его нормативно-количе-



**Рис. 1.** Микрофотографии включений графита (черное) в гранатах (а, б), омфаците (в, г) из графитовых эклогитов. gr — гранат, omf — омфацит

ственном составе преобладает альмандин.

Омфацит представлен двумя разновидностями. Омфацит-I составляет основную массу породы в виде короткопризматических кристаллов размером до 0.2—0.3 мм со слабым плеохроизмом от бесцветного до светло-зеленоватого. Часто содержит многочисленные включения графита (рис. 1, в, г) размером 0.01—0.03 мм. Омфацит-II присутствует в виде разноориентированных прожилково-шлировидных обособлений мощностью до нескольких мм (реже до 0.5—1.0 см). Он представлен призматическими кристаллами размером до 0.25—1.5 мм и имеет более заметный плеохроизм. Химические составы разновидностей близки (омфацит-I: SiO<sub>2</sub> — 47.4, TiO<sub>2</sub> — 1.38, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 10.77, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 2.39, FeO — 3.74, MnO — 0.12, MgO — 5.6, CaO — 10.21, Na<sub>2</sub>O — 5.17, K<sub>2</sub>O — 0.08, C — 11.7, п.п.п. — 1.04, Σ — 99.6, омфацит-II: SiO<sub>2</sub> — 51.1, TiO<sub>2</sub> — 1.19, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 12.05, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 3.52, FeO — 4.37, MnO — 0.18, MgO — 5.3, CaO — 11.8, Na<sub>2</sub>O — 5.65, K<sub>2</sub>O — 0.1, C — 4.74, п.п.п. — 0.2, Σ — 100.2; вес. %), как и содержания жадеитового компонента ≈ 34 %.

Графит в виде многочисленных мелких (0.01—0.05 мм) включений и более крупных скоплений (до 0.5—1.5 мм) сгусткообразной формы присутствует в гранате и омфа-

ците (см. рис. 1), а также в интерстициях между кристаллами породообразующих минералов. Иногда включения микроагрегатов графита имеют кубоидную форму (см. рис. 1), что было описано ранее для безграфитовых эклогитов ММК [10]. Химическое определение содержания углерода в породах варьирует в пределах 15—17 вес. %.

Сравнительный анализ геохимических характеристик графитовых эклогитов с безграфитовыми разновидностями и метаморфизованными габбродиабазами ММК свидетельствует о том, что они обогащены всей группой редкоземельных элементов при резком преобладании LREE. Кроме того, в них отмечаются высокие содержания U, Th, Sr, P и Nd (рис. 2). При относительно простом минеральном составе (гранат+омфацит+графит) основным концентратом REE в породах может являться гранат, а урана и тория — графит. Если гранат графитовых эклогитов обогащен группой LREE, то это в значительной степени отличает его от гранатов «нормальных» безграфитовых эклогитов, так как предыдущими исследованиями было установлено, что в химическом составе граната из типичных эклогитов ММК практически полностью отсутствует вся группа LREE [7].

Для исследования изотопных характеристик углерода были ото-

браны образцы графитовых эклогитов и различных разновидностей углеродсодержащих сланцев, входящих в состав второй стратиграфической единицы ММК, соответствующей карамалинской свите [6].

На термограммах, полученных при дифференциально-термическом анализе углеродистого вещества из графитовых эклогитов, отсутствуют экзо- и эндотермические эффекты, которые можно было бы связать с присутствием геополимеров (нерегулярной структуры (асфальтенокерогенов). Экзотермические эффекты, присутствующие в интервале температур 550—560 °С...900—915 °С с четко выраженными двойными максимумами (730—750 °С и 860—870 °С), свидетельствуют о наличии мелкошуйчатых и крупношуйчатых разновидностей графита. Для углеродсодержащих сланцев и графитовых кварцитов также характерны экзотермические эффекты, но со сдвигом в более низкотемпературную область (интервал 570—890 °С, максимум 660—715 °С), что может свидетельствовать о большей структурной упорядоченности графита из эклогитов.

Изотопные характеристики углерода графитовых эклогитов изменяются в пределах от -22.1 до -25.0 ‰ (табл.), составляя в среднем -23.8 ‰, что в целом близко к содержанию δ<sup>13</sup>C в углеродсодержащих сланцах при небольшом «облегчении» их среднего значения — δ<sup>13</sup>C = -24.95 ‰.

С одной стороны близость изотопных характеристик графитовых эклогитов и углеродсодержащих сланцев можно объяснить метаморфизмом первично биогенного органического углерода, входившего в состав сланцевых толщ, так как минимальная температура появления графитовой фазы равна ≈ 400 °С, а термобарические условия формирования минеральных ассоциаций эклогитов оцениваются в 17 кбар при температуре ~ 570 °С [6]. Более того, ряд исследователей допускает, что первоначальный пиковый метаморфизм пород ММК мог осуществляться в пределах поля стабильности алмаза с максимальными термодинамическими параметрами: T ≈ 650 °С, P ≈ 3.2 GPa [10, 14]. Сам процесс графитизации пород можно представить в виде перехода газообразных восста-

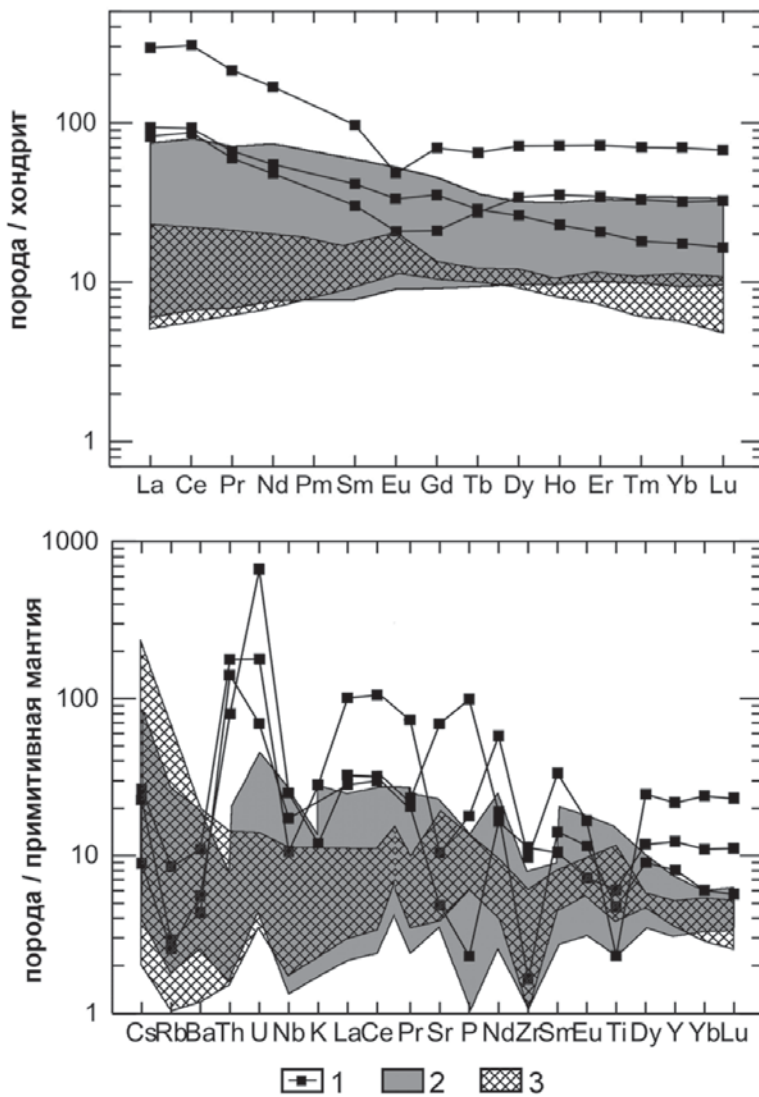


Рис. 2. Спайдер-диаграммы для метаморфических пород максютовского метаморфического комплекса. Хондрит и примитивная мантия по [15].

1 — графитовые эклогиты, 2 — эклогиты и глаукофанизированные эклогиты, 3 — метагаббродиабазы и аподиабазовые ортосланцы. Содержания РЗЭ определены на масс-спектрометре ELAN-9000 на масс-спектрометрической системе высокого разрешения HR ICP-MS ELEMENT2 (ThermoFinnigan) в лаборатории физических и химических методов исследования ИГиГ УрО РАН (г. Екатеринбург)

#### Изотопный состав углерода из графитовых эклогитов и углеродсодержащих сланцев максютовского комплекса

№ п/п	№ обр.	Порода	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}, \%$
1	A-12191	графитовый эклогит	-25.0
2	A-12193	графитовый эклогит	-24.2
3	A-5654	графитовый эклогит	-22.1
4	A-7499	графитовый эклогит	-23.8
5	A-6299	графит-амфибол-кварцевый сланец	-25.5
6	A-5570	углисто-слюдисто-кварцевый сланец	-23.6
7	A-5591	графит-кварцевый сланец	-24.7
8	A-5629	графит-кварцевый сланец	-24.2
9	A-6112	графит-кварцевый сланец	-25.5
10	A-7506	графитовый кварцит	-26.2

Примечание: Измерение изотопного отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  проведено на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 в ИГиГ УрО РАН (г. Екатеринбург). Воспроизводимость анализа изотопного отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  менее  $\pm 0.1 \%$ .

новленных форм углерода в газообразный оксид и графит по схеме:  $\text{C}_n\text{H}_m + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow + \text{C}^0 \downarrow$ . При этом упорядочение структуры углеводородов от асфальтенов—керогенов, геополимеров нерегулярной структуры к графиту с кристаллической трехмерной структурой приводит к «утяжелению» их изотопного состава (керит  $-25.5 \%$ ; антраксолит  $-25.0 \%$ ; графит  $-23.9 \%$ ) [5].

С другой стороны, наличие включений графита в гранатах и омфацитах графитовых эклогитов подразумевает, что углерод присутствовал первоначально в протолитах, по которым они образовались, а изотопные характеристики графита, рассеянного в силикатной массе пород мантии, по данным Э. М. Галимова с соавторами, колеблются в интервале  $-21.96 \dots -26.46 \%$  [3]. Более того, относительная редкость и локальность распространения данных образований среди пород комплекса не позволяет предполагать переход биогенного углерода из сланцев в газообразную фазу с последующим перераспределением и кристаллизацией графита в эклогитах, т. к. в таком случае значительная часть эклогитов ММК относилась бы к графитовым или графитосодержащим разновидностям.

Магматические образования с породообразующим графитом относятся к редкому типу пород, но тем не менее они описаны в структурно-вещественных комплексах Восточно-Европейской платформы [2]. Следовательно, можно предположить, что протолитами графитовых эклогитов ММК являлись близкие по составу породы либо они являются фрагментами мантийных эклогитов, тектонически внедренными в субстрат комплекса при взаимодействии субдуцирующей плиты с веществом верхней мантии [13].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашения № 8358 и № 8312).*

#### Литература

- Алексеев А. А., Алексеева Г. В. Графитовый эклогит из максютовского метаморфического комплекса, Южный Урал // ДАН, 2000. Т. 372. № 1. С. 86—88.
- Галдобина Л. П., Калинин Ю. К. Магматизм, метаморфизм и геохро-





нология докембрия Восточно-Европейской платформы в связи с крупномасштабным картированием. Петрозаводск, 1987. С. 76—77.

3. Галимов Э. М., Соловьева Л. В., Беломестных А. В. Изотопный состав углерода метасоматически измененных пород мантии // Геохимия, 1989. № 4. С. 508—515.

4. Ковалев С. Г., Тимофеева Е. А., Пиндюрина Е. О., Ковалев С. С. Геохимия и условия образования эклогитов максютовского комплекса // Геологический сборник № 9. Информ. мат-лы / ИГ УНЦ РАН. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2011. С. 236—245.

5. Поцелуев А. А. Углеродистые вещества в гидротермальных урановых и редкометалльных месторождениях // Известия Томского политех. ун-та, 2010. Т. 316. № 1. С. 16—23.

6. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

7. Рахимов И. Р., Беликова Г. И., Мороз Т. Н., Салихов Д. Н. Новые

данные о распределении микроэлементов в гранатах Максютовского метаморфического и Миндякского габброидного комплексов, Южный Урал // Металлогения древних и современных океанов—2011. Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 258—262.

8. Beane R. and M. Leech. The Maksyutov Complex: The first UHP terrane 40 years later. Geological Society of America Special Papers, January 1, 2007. 419(0). P. 153—169.

9. Beane R. J. and J. N. Connely.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , U—Pb, and Sm—Nd constraints on the timing of metamorphic events in the Maksyutov Complex, southern Ural Mountains. *Journal of the Geological Society*, 2000. V. 157. № 4. P. 811—822.

10. Bostick B. C., Jones R. E., Ernst W. G., Chen C., Leech M. L. and Beane R. J. Low-temperature microdiamond aggregates in the Maksyutov Metamorphic Complex, South Ural Mountains, Russia // *American Mineralogist*, 2003. V. 88. P. 1709—1717.

11. Brown D., Hetzel R., and J. H. Scarrow. Tracking arc-continent colli-

sion subduction zone processes from high-pressure rocks in the southern Urals. *Journal of the Geological Society*. September 1, 2000. 157(5). P. 901—904.

12. Deines P. The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths // *Earth. Sci*, 2002. Rev. 58. P. 247—278.

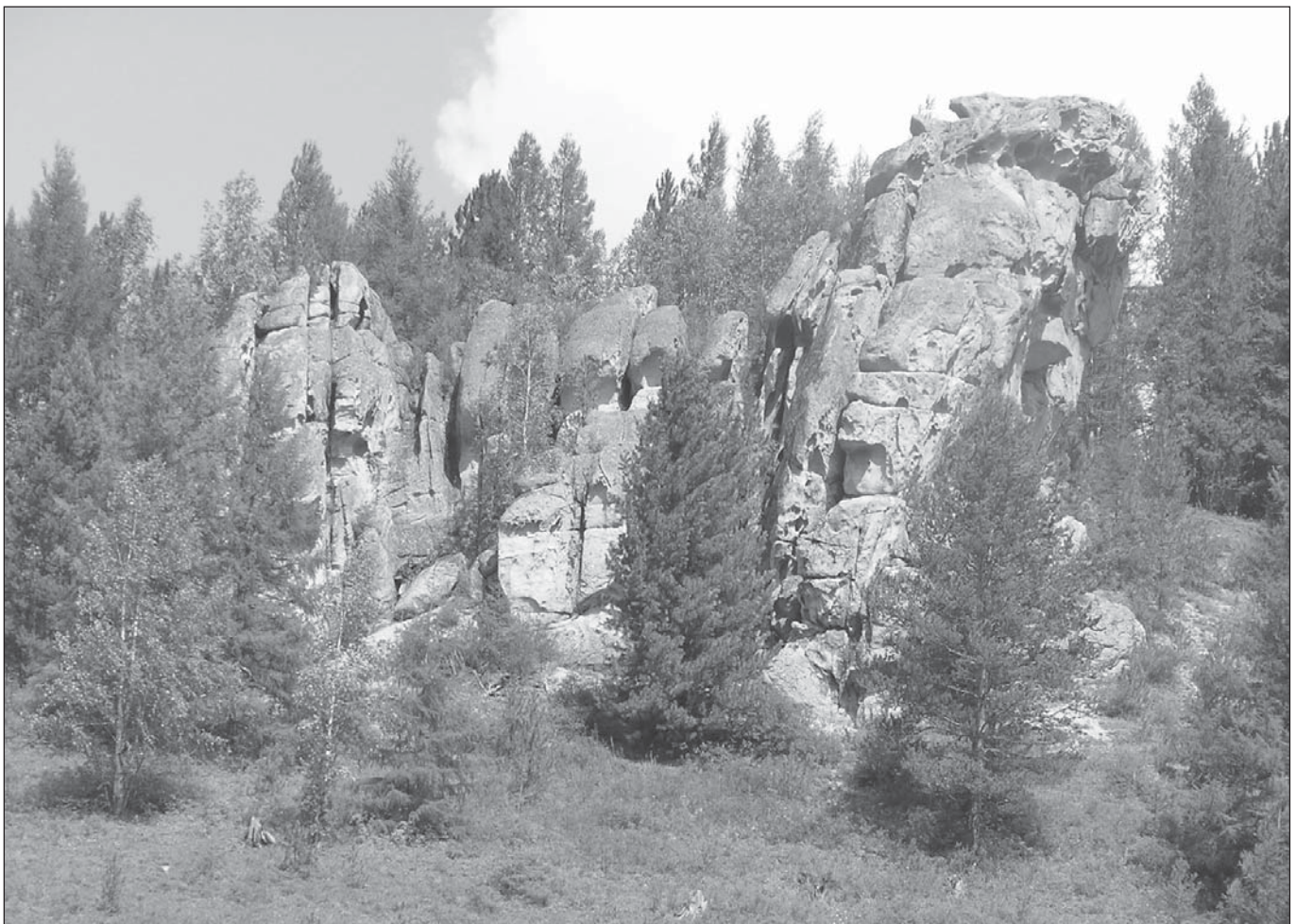
13. Hetzel R. Geology and geodynamic evolution of the high-P/low-T Maksyutov Complex, Southern Urals, Russia // *Geol. Rundschau*, 1999. V. 87. P. 577—588.

14. Leech M. L., Ernst W. G. Petrotectonic evolution of the high to ultrahigh-pressure Maksyutov Complex, Karayanova area, south Ural Mountains: structural and oxygen isotope constraints // *Lithos*, 2000. V. 52/ P. 235—253.

15. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes // *Magmatism in the oceanic basins*. London: Geol. Soc. Spec. Publ., 1989. P. 313—345.

Рецензент

д. г.-м. н. А. М. Пыстин



Останцы. Фото О. Удоратиной