

**ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОХИМИИ ИЗОТОПОВ КИСЛОРОДА  
В МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОДАХ ХАБАРНИНСКОГО  
МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВОГО АЛЛОХТОНА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ**

**А.П. Бирюзова**

*Институт геологии и геохимии УрО РАН*

*620151, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7*

*E-mail: biryuzova@igg.uran.ru*

*Поступила в редакцию 21 августа 2006 г.*

В работе приводятся первые данные об изотопном составе кислорода в породах и минералах восточно-хабарнинского мафит-ультрамафитового комплекса (ВХК) и, подстилающих его метаморфических пород, входящий в структуру Хабарнинского аллохтона Сакмарской зоны Южного Урала. Показано, что габбро-нориты и вебстериты ВХК обладают выдержанным составом изотопов кислорода, соответствующим мантийно-магматическим меткам  $+5...+8\text{‰ } \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ . Таким же составом кислорода обладают и породообразующие минералы из этих пород. Метаморфические породы характеризуются тяжелым составом кислорода, в интервале  $+10...+15\text{‰ } \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , а минералы обладают широкими вариациями изотопного состава, что отражает более низкие температуры их образования по сравнению с минералами ВХК. Тяжелый изотопный состав кислорода, изученных метаморфических пород, свидетельствуют об осадочном происхождении субстрата.

Ключевые слова: *метаморфические породы, магматические породы, изотопия кислорода, осадочная природа протолита, Хабарнинский аллохтон, Урал.*

**THE FIRST DATA OF OXYGEN ISOTOP GEOCHEMISTRY  
FROM METAMORPHIC AND MAGMATIC ROCKS OF KHABARNY  
MAFIC-ULTRAMAFIC ALLOCHTHON IN THE SOUTH URALS**

**A.P. Biryuzova**

*Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS*

The first data of oxygen isotopic composition from rock and rock-forming minerals of the East-Khabarny mafic-ultramafic complex (EKC) and underlying metamorphic sequence including in Khabarny allochthon of the Sakmara zone in the South Urals, is considered. It is shown, that gabbro-norite and websterite of EKC have stable oxygen isotope composition corresponding to mantle-magmatic marks  $+5...+8\text{‰ } \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ . Rock-forming minerals from these rocks have similar isotope composition. Metamorphic rocks are characterized by heavy oxygen isotope  $+10...+15\text{‰ } \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ . The minerals from these rocks have wide variation of isotope composition, reflecting lower temperature of their formation in comparison with EKC. Heavy oxygen isotope composition in metamorphic rocks is the indicator of sedimentary nature of primary protolith.

Key words: *metamorphic rocks, magmatic rocks, oxygen isotopes, sedimentary nature of protolith, Khabarny allochthon, Urals.*

Определение природы субстрата глубоко метаморфизованных пород, в которых не сохранились первичные структуры, является сложной задачей петрологии [Предовский, 1980]. Мы столкнулись с такой проблемой при изу-

чении метаморфических пород, входящих в состав Хабарнинского мафит-ультрамафитового аллохтона, расположенного в Сакмарской зоне Южного Урала. Не останавливаясь на характеристике геологического строения метаморфи-

ческого комплекса, подробно описанного нами ранее [Бирюзова, Пушкарев, 2004; Пушкарев и др., 2004; Пушкарев, 2006], отметим, что он состоит из двух толщ, нижней – метавулканогенной и верхней – метавулканогенно-метатерригенной. Горные породы нижней толщи представлены однородными расщепленными эпидотовыми амфиболитами, вулканогенная природа субстрата которых больших сомнений не вызывает. Горные породы верхней толщи непосредственно контактируют и подстилают габбро-нориты восточно-хабарнинского мафит-ультрамафитового комплекса [Петрология..., 1991] и метаморфизованы в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций. Толща характеризуется широким литологическим разнообразием пород, входящих в ее состав. Здесь были выделены следующие типы пород: амфиболиты, гранатовые амфиболиты, двупироксеновые кристаллические сланцы с гранатом или без него, гранатиты, гранат-амфиболовые гнейсы и кварцито-гнейсы, кварциты, пироксеновые кварциты, гранат-мусковитовые сланцы, магнезиально-известковистые скарны, кальцифиры и другие породы, находящиеся в непрерывном переслаивании. Большинство этих пород подвержены сильным пликативным деформациям и интенсивно перекристаллизованы. Эти преобразования полностью уничтожили первичные структуры пород и изменили их минеральный состав. Природа первичных субстратов пород верхней толщи является открытым вопросом. Петрохимические исследования и геохимия редких и редкоземельных элементов не всегда могут дать ответ на этот вопрос [Бирюзова, Пушкарев, 2005, 2006]. Чтобы приблизиться к решению этой задачи, нами проведено изучение стабильных изотопов кислорода в метаморфических породах и минералах из них и для сравнения были изучены породы и минералы восточно-хабарнинского мафит-ультрамафитового комплекса (ВХК), непосредственно перекрывающих в разрезах метаморфиты. Дополнительно выполнены единичные определения изотопного состава кислорода в минералах из магматических пород молостовского комплекса, родственного по петрогеохимическим данным ВХК [Петрология..., 1991]. Предварительные результаты этого исследования представлены в данной статье.

Определения изотопного состава кислорода, водорода и углерода в минералах были проведены в аналитическом центре ДВГИ РАН

(рук. А.И. Игнатъев). Подготовка образцов к масс-спектрометрическому изотопному анализу кислорода проведена по методике фторирования. Для выделения кислорода использован  $\text{BrF}_5$ . Реакцию проводят в никелевых реакторах при температуре 500-650°C. Выделенный при реакции кислород очищают от продуктов реакции и остатков реактива на криогенных ловушках и на поглотителе  $\text{KBr}$ . Чистый кислород вымораживают в отдельный контейнер на силикагель при температуре жидкого азота. Измерение изотопных соотношений  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 252 с использованием двойной системы напуска. Вес анализируемых образцов составляет 2-5 мг. Воспроизводимость определения  $\delta^{18}\text{O}$  ( $1\sigma$ ) образцов составляет 0,2 ‰,  $n = 5$ . Калибровка метода проведена по лабораторным стандартам и международным стандартам NBS-28, NBS-30. Изотопный состав кислорода в изученных породах и минералах приведен в табл. 1, 2, и отражен на рис. 1.

Изотопный состав кислорода большинства проб габбро-норитов и вебстеритов ВХК находится в интервале, соответствующем мантийным +5,7 и магматическим +6...+8 меткам [Фор, 1989; Stable..., 1986]. Важным является то, что сходным изотопным составом кислорода обладают как породы, так и породообразующие минералы, пироксены, амфиболы и плагиоклазы. Все они характеризуются мантийно-магматическими метками кислорода и равномерным распределением изотопов между собой, что свидетельствует о высокой температуре их образования [Stable..., 1986]. Заметное утяжеление кислорода происходит только в пробах габбро-норитов, непосредственно залегающих на контакте с кварцитами и кварцито-гнейсами метаморфической толщи (пробы Хб-1919, 1920). Изотопное отношение  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  в этих породах поднимается до значений +9...+10 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  и свидетельствует об изотопном обмене с тяжелым кислородом метаморфических пород, т.е. о проявлении процесса контаминации. Сходным утяжеленным составом кислорода обладают и некоторые проблематичные породы основного состава с гранобластовой (роговиковой) структурой, образующие пластовые тела в габбро-норитах и вебстеритах ВХК (пробы Хб-636, 1895, 864). Они практически совпадают с составом кислорода +10,6 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  в пробе Хб-867а, представленной пироксеновым роговиком с кварцем и

рутилом, который совместно со слоем пироксеновых кварцитов (Хб-1238) образует крупный линзообразный ксеноблок в вебстеритах ВХК. Тяжелый состав кислорода +10,6...+12,1 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , соответствующий осадочным породам, имеют двупироксен-оливиновые роговики или гранулиты Хб-878, 879, образующие ксеноблоки в вебстеритах. По изотопному составу кислорода эти породы совпадают с метаморфическими породами из экзоконтактового ореола ВХК, которые более подробно охарактеризованы ниже.

Практически все метаморфические породы обладают более тяжелым изотопным составом кислорода, варьирующим в интервале +10...+15 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , при этом, наиболее легким оказался кислород из амфиболов массивных амфиболитов верхней метавулканогенно-метатерригенной толщи +7,4...+8,5 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  и фассаитов магнезиально-известковистых скарнов +6...+6,3 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , близкие к значениям магматических пород. Напротив, кварц и полевые шпаты характеризуются очень тяжелым составом кислорода +13...+19 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ .

Таблица 1

Изотопный состав кислорода габбро-норитов и вебстеритов восточно-хабарнинского комплекса и минералов из них (‰)

Проба	Порода	Минерал	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$
Хб-540	Клинопироксенит молостовского комплекса	амфибол	5,1
		клинопироксен	5,4
		хромдиоксид	7,4
570/327	Горнблендиты	амфибол	5,9
570/307	Горнблендиты	амфибол	7,5
Хб-829	Вебстерит	клинопироксен	6,7
		ортопироксен	6,8
Хб-1257	Вебстерит, дайка	амфибол	7,3
		клинопироксен	6,7
		ортопироксен	7,2
Хб-1195	Вебстерит	амфибол	6,4
		клинопироксен	6,5
		ортопироксен	7,3
ХБ-888	Вебстерит	клинопироксен	6,7
		ортопироксен	6,9
Хб-851	Габбро-норит	порода	7,1
		клинопироксен	7,8
		плагиоклаз	7,6
Хб-855	Габбро-норит	порода	8,0
		плагиоклаз	8,0
Хб-857	Габбро-норит	порода	8,5
		плагиоклаз	9,9
Хб-858	Плагио-вебстерит	клинопироксен	7,3
		ортопироксен	7,6
Хб-870а	Габбро-норит, пластовое тело в вебстеритах	порода	7,0
		плагиоклаз	8,6
Хб-1907	Габбро-норит лейкократовый, пластовое тело в габбро-норитах	порода	8,6
ХБ-1908	Габбро-норит лейкократовый	плагиоклаз	8,0
Хб-1895	Габбро-норит	порода	9,0
ХБ-1898а	Габбро-норит лейкократовый	плагиоклаз	8,0
Хб-1919	Габбро-норит в контакте с кварцитами	порода	10,2
Хб-1920	Габбро-норит в контакте с кварцитами	порода	9,9
Хб-636	Габбро-норит лейкократовый, пластовое тело в вебстеритах	клинопироксен	8,7
		плагиоклаз	11,9
		порода	10,5
Хб-864б	Пластовое тело габбрового состава в вебстеритах	плагиоклаз	10,9
Хб-867а	Пластовое тело габбрового состава в вебстеритах	порода	10,6

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОХИМИИ ИЗОТОПОВ

Таблица 2

Изотопный состав кислорода метаморфических пород и минералов из них (‰)

Проба	Порода	Минерал	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$
Хб-1767	Амфиболит	амфибол	8,2
		плагиоклаз	13,8
Хб-1768	Амфиболит	амфибол	7,4
Хб-1783	Амфиболит	амфибол	8,1
Хб-1811	Амфиболит	амфибол	7,8
Хб-1870	Амфиболит	плагиоклаз	11,4
485/155	Амфиболит	амфибол	8,3
485/127	Амфиболит	амфибол	9,8
Хб-1779	Гранатовый амфиболит	кварц+плагиоклаз	14,0
		гранат	6,1
		амфибол	7,8
Хб-1773	Кварцито-гнейс гранатовый	кварц	18,2
Хб-1776	Кварцито-гнейс	кварц+плагиоклаз	15,1
Хб-1777	Кварцито-гнейс	кварц+плагиоклаз	14,8
Хб-1786	Кварцито-гнейс	кварц	17,3
Хб-1794	Кварцито-гнейс куммингтонитовый	кварц+плагиоклаз	13,4
Хб-1830	Графитовый гнейс	кварц	14,2
Хб-1868	Кварцито-гнейс гранатовый	кварц	18,1
Хб-1872	Кварцито-гнейс гранатовый	кварц	19,1
		гранат	15,4
Хб-1873	Кварцито-гнейс гранатовый	кварц	18,6
Хб-1921	Двупироксеновый кристаллический сланец	порода	11,7
Хб-1922	Двупироксеновый кристаллический сланец	порода	11,2
		плагиоклаз	12,7
		ортопироксен	10,9
Хб-2110	Двупироксеновый-гранатовый кристаллический сланец	порода	15,2
Хб-2011	Высокомарганцевый двупироксен-гранатовый гранулит	порода	12,3
Хб-1933	Гранатит	гранат	10,5
Хб-878	Двупироксеновый метабазит. ксеноблок в вебстеритах	порода	12,1
Хб-879	Двупироксен-биотитовый метабазит. ксеноблок в вебстеритах	порода	10,6
Хб-1946	Двупироксеновый метабазит. ксеноблок в вебстеритах	клинопироксен	11,1
Хб-902	Силикатный мрамор (кальцифир)	фассаит	17,8
Хб-828	Магнезиально-известковистый фассаит-гранатовый скарн	клинопироксен	10,2
Хб-2218	Антофилит-шпинелевая порода	амфибол	8,5

Для изученных метаморфических пород обычными являются широкие вариации изотопного состава кислорода в разных минералах одной породы, что свидетельствует о более низких температурах равновесий по сравнению с габбро-норитами и вебстеритами ВХК. Обычно эти различия соответствуют предложенному Тейлором и Эпштейном ряду минералов с различной способностью к концентрированию изотопа  $^{18}\text{O}$  [Taylor, Epstein, 1962].

*Тонкополосчатые амфиболиты* верхней толщи. Изотопный состав кислорода был опре-

делен в плагиоклазах +11,4...+13,8 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  и в амфиболах +8,2...+9,8 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ . Очевидно, что валовой состав изотопов кислорода в породах составит не ниже +10 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ .

*В гранатовых амфиболитах* изотопный состав кислорода определен для граната, амфибола и кварц-плагиоклазового концентрата из пробы Хб-1779. Так, для граната  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +6,1$  ‰, амфибола +7,8 ‰, а для кварц-плагиоклазового концентрата  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  равно +14,0 ‰. В соответствие с количественным распределением этих минералов в породе ее валовой

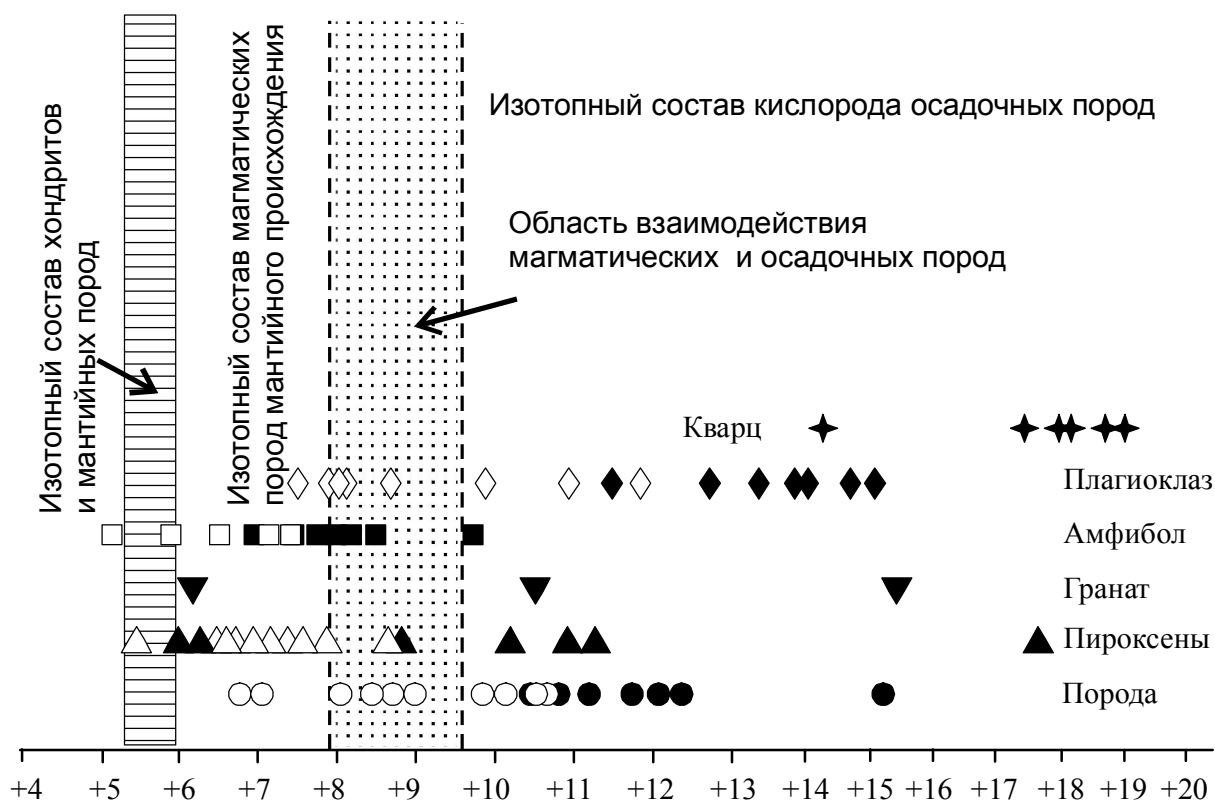


Рис. 1. Изотопный состав кислорода (‰,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ).

Черные значки – метаморфические породы и породообразующие минералы (клинопироксен, ортопироксен, амфибол, плагиоклаз, гранат, кварц); Белые значки – габброиды и пироксениты восточно-хабарнинского и молостовского комплексов и минералы из них. Поля мантийных, магматических и осадочных пород по [Stable..., 1986].

изотопный состав будет не ниже +9...+10 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ .

*Гнейсы, кварцито-гнейсы, кварциты* обогащены тяжелым изотопом кислорода, поскольку главным минералом в них является кварц и полевые шпаты, в которых  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  варьирует от +13,4 до +19,1 ‰. Удивительно, что и для граната из этих пород  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  составляет +15,4 ‰, тогда как в ряду Тэйлора, гранат занимает место близкое к пироксенам – минералам слабо концентрирующим тяжелый изотоп кислорода. Это может свидетельствовать только об осадочном происхождении субстрата этих пород, источником для которых послужили породы континентальной коры, обогащенные тяжелым изотопом кислорода.

*Двупироксеновые кристаллические гнейсы (гранулиты)* основного и среднего состава обогащены тяжелым изотопом кислорода. Обладая минеральным составом, приближающимся к габбро-норитам ВХК, эти породы имеют

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +11...+15$  ‰. Более того, даже ортопироксены концентрируют в себе тяжелый изотоп кислорода  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 10,9$  ‰, а в плагиоклазе  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +12,7$  ‰. Эти данные свидетельствуют об осадочном происхождении субстрата гранулитов.

*Гранатиты.* Изотопный состав кислорода был определен только в гранате – главном минерале гранатитов. Он оказался обогащенным тяжелым изотопом и равным  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +10,5$  ‰, что может свидетельствовать также об осадочной природе протолита, по которому образовалась эта порода.

Таким образом, подавляющее большинство минералов из метаморфических пород характеризуется обогащенностью тяжелым изотопом кислорода. Так, для амфиболов, пироксенов и гранатов из метаморфических пород вариации изотопного состава кислорода находятся в интервале от +6 до +15 ‰  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , при преобладающих значения около +9...+10 ‰.

## ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГЕОХИМИИ ИЗОТОПОВ

Изотопный состав кислорода в полевых шпатах и кварцах из этих же пород соответствует интервалу  $+11...+19\text{‰}$   $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , а средние значения близки к  $+14\text{‰}$ . Состав кислорода в породах находится в интервале  $+10...+15\text{‰}$   $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ . Эти данные свидетельствуют, что субстратом для большинства изученных нами метаморфических пород, независимо от их литологического состава, послужили осадочные породы, в различной степени насыщенные дезинтегрированным материалом магматического происхождения (вулканические породы и туфы основного и среднего состава, интрузивные породы основного, среднего и кислого состава) [Stable..., 1986].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-05-64795-а и 04-05-96009-р2004урал\_а), целевой программы междисциплинарных проектов УрО РАН, СО РАН 2005 г., Интеграционного проекта СО РАН 210, гранта «Фонда содействия отечественной науке», и гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-4210.2006.5).*

### Список литературы

- Бирюзова А.П., Пушкарев Е.В.* Высокометаморфизованные метаосадочные породы в обрамлении и в составе восточно-хабарнинского ультрамафит-мафитового комплекса (Южный Урал) // Геология и металлогения ультрамафит-мафитовых и гранитоидных интрузивных ассоциаций складчатых областей. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. С. 99-103.
- Бирюзова А.П., Пушкарев Е.В.* Метаморфические породы гранулитовой фации в составе Хабарнинского мафит-ультрамафитового аллохтона // Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 133-142.
- Бирюзова А.П., Пушкарев Е.В.* О химическом составе амфиболитов восточного обрамления Хабарнинского массива на Южном Урале // Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 106-112.
- Петрология постгартцбургитовых интрузивов Кемпирсайско-Хабарнинской офиолитовой ассоциации (Южный Урал) / П.А. Балыкин, Э.Г. Конников, А.П. Кривенко и др. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 160 с.
- Предовский А.А.* Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л.: Наука, 1980. 152 с.
- Пушкарев Е.В.* Геологическое строение Хабарнинского мафит-ультрамафитового аллохтона по данным бурения и наземных исследований: взаимоотношения мантийных и коровых комплексов // Офиолиты: геология, петрология, металлогения и геодинамика. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 129-139.
- Пушкарев Е.В., Готтман И.А., Бирюзова А.П.* Особенности геологического строения комплекса метаморфических пород в восточном экзоконтакте Хабарнинского массива на Южном Урале // Ежегодник-2003. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. С. 189-193.
- Фоп Г.* Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
- Stable isotopes in high temperature geological processes. Reviews in mineralogy / Ed. J.W. Valley, H.P. Taylor, J.R. O'Neil. Mineral. Soc. of America. 1986. V. 16. 570 p.
- Taylor H.P., Epstein S.* Relationship between  $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$  ratios of co-existing minerals of igneous and metamorphic rocks, part 1 and 2 // Bull. Geol. Soc. Amer. 1962. V. 73. P. 461-480.

*Рецензент доктор геол.-мин. наук А.И. Русин*