

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ Re-Os ИЗОТОПНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДАТИРОВАНИЯ МАНТИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ, НА ПРИМЕРЕ ОФИОЛИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Батанова В.Г.*, Брюгманн Г.Е.****,** Савельева Г.Н.***, Соболев А.В.*

**Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, Россия
e-mail: batanova@geokhi.ru*

***Институт наук о Земле, Университет г. Майнца, Германия
e-mail: bruegmag@uni-mainz.de*

****Геологический институт РАН, Москва, Россия
e-mail: savelieva@ginras.ru*

APPLICATION OF Re-Os ISOTOPE SYSTEM TO DATING OF MANTLE PROCESSES: EVIDENCE FROM OPHIOLITES

Batanova V.G.*, Bruegmann G.E.****,** Savelieva G.N.***, Sobolev A.V.*

**Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia
e-mail: batanova@geokhi.ru*

***Institut für Geowissenschaften, Universität Mainz, Mainz, Germany
e-mail: bruegmag@uni-mainz.de*

****Geological Institute RAS, Moscow, Russia
e-mail: savelieva@ginras.ru*

Because of its unique geochemical properties Re-Os system is particularly useful in tracing the geochemical evolution of mantle rocks and in defining the chronology of mantle processes such as partial melting and melt percolation. Here we present our data on the HSE and Re-Os systematic of the mantle lithologies from Mamonia (Cyprus) and Voykar (Polar Urals) Ophiolite complexes.

Re-Os изотопная система обладает уникальными свойствами, которые делают ее незаменимой при рассмотрении геохимической эволюции мантийных пород и определении геохронологии мантийных процессов, таких как частичное плавление и миграция расплавов. Эта изотопная система основана на радиоактивном распаде $^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os}$. При частичном плавлении мантии, осмий остается в остаточном перидотите, в отличие от других изотопных систем (например Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf, U-Th-Pb), где оба материнский и дочерний изотопы преимущественно распределяются в расплав. Рений, наоборот, ведет себя как умеренно несовместимый элемент. Это приводит к фракционированию Re/Os отношения в процессе частичного плавления мантии: мантийные рестины характеризуются очень низкими, а расплавы высокими отношениями Re/Os. Кроме того, Re и Os относятся к группе высоко-сидерофильных элементов (ВСЭ), содержание которых в веществе Земли контролируется не силикатными, а металлической, сульфидной и оксидной фазами, присутствующими в мизерных количествах в коре и мантии. В отличие от силикатов, эти фазы более чувствительны к фугитивности кислорода и серы [13].

Для определения возраста мантийных пород в Re-Os системе могут использоваться как изохронный, так и модельный (T_{MA}) методы. Дополнительно, только для Re-Os системы существует специфический подход определения возраста мантийных перидотитов, образовавшихся в результате частичного плавления и обедненных Re. Это модельный возраст обеднения Re (T_{RD}), расчет которого основывается на том, что при высоких степенях плавления концентрация Re в остатке от плавления близка к нулю, в этой точке T_{RD} и T_{MA} эквивалентны. Применение T_{RD} позволяет избежать проблем избыточного Re в мантийных перидотитах, вызванного инфльтрацией магм или привнесом в результате процессов вторичного изменения. T_{RD} показывает минимальный возраст частичного плавления перидотита и отделения базальтового компонента [17].

Вместе с Os и Re, и другие ВСЭ (Ir, Ru, Rh, Pt, Pd), широко используются для расшифровки мантийных процессов. В мантийных породах ВСЭ содержатся в хондритовых пропорциях, а их концентрации на два порядка выше, чем те, которые определяются из химического равновесия ядра и мантии Земли. Это обычно объясняется аккрецией небольшого количества хондрито-

вого вещества (~1% по массе) после формирования ядра [14]. Показано, что в мантийных лерцолитах 90% всех ВСЭ содержится в Fe-Ni-Cu сульфидах [7]. Поэтому предполагается, что поведение ВСЭ (за исключением рения) в мантийных процессах, контролируется акцессорной сульфидной фазой составляющей <0.05 вес.%. перидотита. Re несмотря на значительное сродство к сульфидной фазе, также в значительных количествах содержится в некоторых силикатах, таких как гранат и ортопироксен [12, 15]. Поведение сульфида при высоких температурах и давлениях недостаточно исследовано. Однако, существующие экспериментальные данные, так же как и данные локального анализа сульфидов в мантийных перидотитах, предполагают, что мантийные сульфиды плавятся инконгруэнтно с образованием Cu-Ni сульфидного расплава и твердой фазы, представленной Fe-Ni моносульфидным твердым раствором. При этом Os, Ir и Ru накапливаются в твердой Fe-Ni сульфидной фазе, а Pt, Pd, и Re покидают перидотит вместе с сульфидным расплавом [7, 11, 16]. Так или иначе, но при частичном плавлении мантии происходит фракционирование ВСЭ, причем коэффициенты распределения *кристаллическая фаза/расплав* уменьшаются в ряду Os→Ir→Ru→Pt→Pd→Re [8]. Таким образом, спектры распределения ВСЭ в мантийных перидотитах, образовавшихся в результате частичного плавления, обеднены Pt, Pd, и Re относительно Os, Ir и Ru. Мантийные расплавы имеют спектры комплиментарные перидотитам с относительным обогащением Pt, Pd, и Re. Вследствие возможного привноса в перидотиты сульфидов при просачивании и миграции расплавов, анализ спектров ВСЭ мантийных перидотитов играет важную роль при интерпретации возрастов плавления, полученных на основании Re-Os изотопной системы.

Исследование Re-Os изотопной системы и распределения ВСЭ в мантийных разрезах офиолитовых комплексов предоставляет важную информацию о процессах протекавших в мантии под зонами спрединга. В данном докладе предполагается изложить материалы авторов, по изучению мантийных разрезов комплекса Мамония (о-в Кипр) и Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал).

На примере перидотитов комплекса Мамония была изучена Re-Os система для мантийных пород, входивших в литосферную мантию океана Неотетис [6] существовавшего в поздне триасовое – раннеюрское время. Перидотиты этого комплекса представлены в основном шпинелевыми лерцолитами, которые показывают широкий интервал составов [1]. Наблюдаемые в породах хорошие корреляции между петрологическими индикаторами степени обеднения остаточного мантийного вещества базальтовым компонентом, такими как $Fo (100 * Mg / (Mg + Fe^{2+}))$ в оливине, $Cr / (Cr + Al)$ в шпинели, содержание Al и тяжелых РЗЭ в клинопироксене, свидетельствуют о том, что данный интервал составов перидотитов образовался в результате различных степеней плавления мантии. Степени плавления, рассчитанные на основании $Cr / (Cr + Al)$ в шпинели [9] варьируют в интервале от 1 до 9%. Содержания Os, Ir, Ru, Rh, Pt, Pd показывают хорошие положительные корреляции относительно степени плавления, свидетельствующие о совместимом поведении этих элементов. Эти корреляции позволили оценить содержание ВСЭ в мантийном источнике. Определение возраста по методу изохроны для перидотитов Мамонии оказалось невозможным, из-за мобильного поведения рения и его привноса в породы в процессе серпентинизации. В тоже время, шпинелевые лерцолиты характеризуются низкими субхондритовыми отношениями $^{187}Os / ^{188}Os_{(t=0)}$, которые свидетельствуют о древнем возрасте процесса плавления. После корреляции на привнос рения, были рассчитаны T_{MA} и T_{RD} перидотитов [9]. По возрастам перидотиты формируют три кластера: 250 млн. лет., 600-800 млн. лет. и >1 млрд. лет. Таким образом, образцы перидотитов из комплекса Мамония, вероятно, представляют собой гетерогенную верхнюю мантию, которая испытала несколько этапов обеднения вещества, наиболее древний из которых мог быть связан с событиями сопровождавшими Пан-африканский рифтогенез, а наиболее поздний (200-300 млн. лет) отвечает времени магматизма Неотетиса.

В Войкаро-Сыньинском офиолитовом комплексе мантийные реститогенные перидотиты составляют значительную часть разреза (мощностью до 6 км). Породы мантийного комплекса хорошо изучены в структурном и вещественном плане [2, 3, 5]. Основная часть мантийного разреза сложена обедненными базальтовым компонентом шпинелевыми гарцбургитами, в которых $Cr / (Cr + Al)$ в шпинели варьирует от 0.25-0.50. Гарцбургиты содержат многочисленные дунитовые тела и жилы мощностью от нескольких см до нескольких сот метров. Наиболее крупные дунитовые тела (до 10 км²) приурочены к осевым зонам складок образованных при высокотемпературном пластическом течении гарцбургитов. С дунитами ассоциируют жилы пироксенитов (вебстеритов, энстатитов, клинопироксенитов). Структурные данные показывают, что формирование сетки дунитовых жил происходило син-

хронно с пластическим течением и образованием крупномасштабных складок в гарцбургитах. Хромитовая минерализация и разнообразные рудные тела присутствуют в гарцбургитах и дунитах на разных структурных уровнях разреза [4]. Структурные особенности дунитовых тел позволяют рассматривать их как дуниты замещения, образовавшиеся в результате реакционных процессов между гарцбургитами и поднимающимися расплавами, происходивших в надсубдукционной обстановке [3,10].

Детальное изучение содержания ВСЭ и изотопов Re-Os было проведено для пород мантийных разрезов верховьев р. Хойла, Левая Пайера и Ямбатьвис. Особенностью пород Войкаро-Сынинского массива является их удивительная свежесть. Это позволяет предположить, что Re-Os изотопная система не нарушена воздействием вторичных процессов. Анализ спектров распределения ВСЭ в гарцбургитах, дунитах и пироксенитах показывает, что среди гарцбургитов имеются разности, образовавшиеся в результате частичного плавления вещества и, видимо, не затронутые последующими модификациями при миграции расплавов. Эти разности характеризуются низким содержанием рения (0.02-0.06 ppb) и очень низкими не радиогенными отношениями $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=0)}$ (0.1149-0.1154). Расчет модельных возрастов этих перидотитов дает близкие значения для T_{MA} и T_{RD} 2.05-2.06 млрд. лет и 1.8-1.9 млрд. лет соответственно, и предполагает Протерозойский этап плавления мантии. Однако составы большей части гарцбургитов были модифицированы при взаимодействии с просачивающимися расплавами. Они значительно обогащены Pt, Pd и Re. Причем степень обогащения увеличивается по направлению к дунитовым и, в особенности, к пироксенитовым жилам, например, содержание рения возрастает от 0.12 до 0.46 ppb, а отношение $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=0)}$ до 0.1303. Содержания ВСЭ и отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}_{(t=0)}$ в дунитах показывают широкие вариации, и объясняется наличием в них смеси остаточного мантийного моносulfида и магматического sulfида, образованного из мигрирующих над-субдукционных расплавов. Более низкие содержания Os, Ir и Ru в дунитах по сравнению с гарцбургитами, объясняются тем, что большая часть мантийного sulfида была мобилизована и вынесена расплавами. Пироксениты характеризуются спектрами распределения ВСЭ и высокими отношениями Re/Os типичными для расплавов, образовавшихся при частичном плавлении мантии. Высокие содержания крупноионных литофильных элементов (Sr) клинопироксенах и Sr, Rb, Ba и Pb в амфиболах из пироксенитовых жил ясно свидетельствует о над-субдукционной природе просачивающихся расплавов.

Все породы (дуниты, пироксениты, хромититы), образованные на этапе просачивания расплавов через гарцбургиты на изохронной Re-Os диаграмме лежат вблизи опорной линии 600 млн. лет. Эти данные согласуются с оценками возраста, полученными по цирконам (U-Pb система) из хромититов 585 ± 6 млн. лет [4].

Независимое определение возраста получено из образца полосчатого перидотита (размером 10×15 см) состоящего из гарцбургитовой, энстатититовой и клинопироксенитовой полос. Исследование минералогии данного образца показало, что полосчатость была сформирована при взаимодействии просачивающегося расплава с гарцбургитом. Причем этот процесс продолжался до достижения химического равновесия между различными частями образца, о чем свидетельствует как идентичный состав главных элементов в минералах ($Fo=90.6$; $Cr/(Cr+Al)_{\text{spl}}=0.51 \pm 0.2$), так и одинаковые содержания несовместимых микроэлементов в клинопироксенах из всех полос образца. Это позволяет предполагать, что Re-Os система также достигла равновесия. В пользу этого также свидетельствует высокое содержание Os и низкое Re в гарцбургите и, наоборот, низкое содержание Os и высокое Re в расплаве, что приводит к быстрому установлению равновесия. Действительно, различные петрографические разности этого образца на Re-Os изохронной диаграмме ложатся на изохрону с возрастом 536 ± 17 млн. лет.

Таким образом, применение Re-Os изотопной системы позволяет выделять и фиксировать разновременные магматические события в мантийных секциях офиолитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базылев Б.А. и др. Петрология гипербазитов комплекса Мамония, юго-западный Кипр // Петрология. 1993. № 1(4). С. 348-378.
2. Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. Труды ГИН СССР, 404. М. Наука, 1987. 246 с.
3. Савельева Г.Н., Соболев А.В., Батанова В.Г., Суслов П.В., Брюгманн Г. Структура каналов транспортировки расплавов в мантии // Геотектоника. 2008. № 6. С. 1-12.

4. Савельева Г.Н., Суслов П.В., Ларионов, А.Н. Вендские тектоно-магматические события в мантийных комплексах офиолитов Полярного Урала: данные U-Pb датирования циркона из хромититов // Геотектоника. 2007. № 3. С. 23-33.
5. Савельева Г.Н., Щербаков С.А., Денисова Е.А. Роль высокотемпературных деформаций при формировании дунитовых тел в гарцбургитах // Геотектоника. 1980. № 3. С. 16-26.
6. Шараськин А.Я., Карякин Ю.В., Книппер А.Л., Хераскова Т.Н. Структурные особенности, состав и тектоническое значение мезозойских образований группы Диаризос (юго-западный Кипр) // Геотектоника. 1995. № 5. С. 83-91.
7. Alard O., Griffin W.L., Lorand J.P., Jackson S.E., O'Reilly S.Y. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulphides // Nature. 2000. V. 407(6806). P. 891-894.
8. Barnes S.J., Naldrett A.J., Gorton M.P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas // Chemical Geology. 1985. V. 53(3-4). P. 303-323.
9. Batanova V.G. et al. Platinum-group element abundances and Os isotope composition of mantle peridotites from the Mamonia complex, Cyprus // Chemical Geology. 2008. V. 248(3-4). P. 195-212.
10. Belousov I.A., Batanova V.G., Sobolev A.V. Melt and fluid transport in mantle wedges: evidence from bulk-rock and mineral geochemistry of mantle section rocks from Voykar Ophiolite (Polar Urals) // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. V. 72(12). P. A70-A70.
11. Bockrath C., Ballhaus C., Holzheid A. Fractionation of the platinum-group elements during mantle melting // Science. 2004. V. 305(5692). P. 1951-1953.
12. Burton K.W. et al. The distribution and behaviour of rhenium and osmium amongst mantle minerals and the age of the lithospheric mantle beneath Tanzania // Earth and Planetary Science Letters. 2000. 183(1-2). P. 93-106.
13. Carlson R.W. Application of the Pt-Re-Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology // Lithos. 2005. V. 82(3-4). P. 249-272.
14. Jagoutz E. et al. The abundances of major, minor and trace elements in the Earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules // R.B. Merrill, D.D. Bogard, F. Hoerz, D.S. McKay, P.C. Robertson (Eds). Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference. N.Y. Pergamon. 1979. P. 2031-2050.
15. Luguët A., Horan M.F., Shirey S.B., Lorand J.P., Carlson R.W. Partitioning of highly siderophile elements (HSE) in very refractory peridotites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. V. 68(11). P. A549-A549.
16. Peregoedova A., Barnes S.J., Baker D.R. The formation of Pt-Ir alloys and Cu-Pd-rich sulfide melts by partial desulfurization of Fe-Ni-Cu sulfides: results of experiments and implications for natural systems // Chemical Geology. 2004. V. 208(1-4). P. 247-264.
17. Shirey S.B., Walker R.J. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1998. V. 26. P. 423-500.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ (МАГНЕТИТА) В СВЯЗИ С ГЕНЕТИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Бахтерев В.В.

*Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
e-mail: bakh@etel.ru*

EXPERIMENTAL RESEARCH INTO ELECTRIC CONDUCTIVITY OF MAGNETITE ORE AT HIGH TEMPERATURE, AND ITS RELATION TO GENETIC PECULIARITIES OF DEPOSIT

Bakhterev V.V.

*Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia
e-mail: bakh@etel.ru*

We applied to investigate temperature dependences of electric resistance and loss tangent in the range from 20 to 800°C in magnetite ore. The samples of ore contain 92-95% magnetite, which differ in structure, mineralogy and genetic peculiarities.