

породах отражает изотопный обмен между ассимилированным сульфатом и магматическим сульфидом в открытой системе. Температуры закрытия, рассчитанные по этим данным, попадают в диапазон 750–820 °С. Мы предполагаем, что ассимиляция осадочного ангидрита происходила путем эрозии, дробления и последующего растворения вмещающих осадочных пород под воздействием динамично внедряющихся инъекций горячей магмы. Термальное разложение, химическое растворение и плавление ксенолитов ангидрита рассматриваются как одинаково возможные процессы ассимиляции, которые происходили преимущественно в центральной части магматического потока и были затруднены вдоль остывающих контактов. Растворенный сульфат по мере достижения насыщения в силикатном расплаве выделялся в несмешиваемую сульфатную жидкость и близодновременно кристаллизовался в виде кумулюционного ангидрита, сосуществовавшего с кумулюсным оливином. Процессы ассимиляции сопровождались сдвигом в более окисленные условия, что подавляло кристаллизацию оливина и способствовало его растворению и преимущественному росту обогащенного алюминием ойкокритового ортопироксена.

Исследования поддержаны РФФИ (грант № 17-05-00456).

Литература

Holwell D. A., Boyce A. J., McDonald I. Sulfur isotope variations within the Platreef Ni-Cu-PGE deposit: Genetic implications for the origin of sulfide mineralization // *Economic Geology*. 2007. Vol. 102. P. 1091–1110.

Leshner C. M. Roles of xenomelts, xenoliths, xenocrysts, xenovolatiles, residues, and skarns in the genesis, transport, and localization of magmatic Fe-Ni-Cu-PGE sulfides and chromite // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 90. P. 465–484.

Naldrett A. J., Kinnaird J. A., Wilson A., Yudovskaya M., Chunnnett G. Genesis of the PGE-enriched Merensky Reef and chromitite seams of the Bushveld Complex // *Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: geology, geochemistry and genesis. Review in Economic Geology*. 2011. Vol. 17. P. 235–296.

Sharman-Harris E., Kinnaird J. A., Harris C., Horstmann U. E., Wing B. A new look at sulfide mineralisation of the northern limb, Bushveld Complex: A stable isotope study // *Applied Earth Sciences*. 2005. Vol. 114B. P. 252–263.

Yudovskaya M. A., Sluzhenikin S. F., Costin G., Shatagin K. N., Dubinina E. O., Grobler D. F., Ueckermann H., Kinnaird J. A. Anhydrite assimilation by Bushveld ultramafic melts and its ore-petrological consequences // *Review in Economic Geology*. 2018, submitted.

Д. Е. Савельев

*Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа
sav171@mail.ru*

Современные модели генезиса офиолитовых хромититов: обзор

Происхождение ультраосновных пород офиолитовых комплексов и связанных с ними месторождений хрома на протяжении долгих лет является предметом оживленной дискуссии. В первой половине XX столетия господствующей гипотезой образования хромититов являлась магматическая, в рамках которой они рассматривались как продукты дифференциации ультраосновной магмы (дунитовой или перидотитовой).

вой). Среди месторождений выделялись раннемагматические сегрегации преимущественно вкрапленных руд и позднемагматические хромититы, образующие наиболее крупные по масштабам скопления массивных и густовкрапленных руд. Предполагалось, что основная масса хромититов внедряется по ослабленным зонам в раскристаллизовавшиеся ультрамафиты в виде рудно-силикатной магмы, богатой летучими компонентами. Большинство исследователей считало, что формирование разреза самих ультрамафитовых массивов происходило в результате кристаллизационной дифференциации [Логинов и др., 1940; и др.]. Большое значение в образовании рудных концентраций часть сторонников магматической гипотезы придавало расслоению ультраосновного расплава (ликвации) на дунитовую и перидотитовую составляющие [Кравченко, 1969; и др.].

Некоторые исследователи предполагали, что мантийные ультрабазиты внедрились в виде «кристаллической каши», внутри которой хромититы находились в кристаллическом состоянии [Thayer, 1964; и др.]. В этих работах предположено, что хромититы сформировались путем аккумуляции из магмы в нижней коре и верхней мантии, а в работе [Dickey, 1975] указано, что они впоследствии могли быть погружены внутрь «кристаллической каши» подстилающих ультрамафитов.

Развитие метасоматической гипотезы [Москалева, 1974; и др.], рассматривающей дунит-гарцбургитовые комплексы с хромовым оруденением как продукт метасоматических преобразований перидотитового (энстатитового) субстрата, было вызвано невозможностью объяснить магматической дифференциацией факт «эпигенетичности» дунитов и хромититов по отношению к окружающим гарцбургитам.

Установление факта, что офиолиты представляют собой сегменты океанической литосферы и того, что подформные хромититы встречаются в мантийных тектонитах, привело к развитию других моделей, ассоциирующих их генезис с океанической корой. С 1970-х годов общепринятым стало представление, что мантийный разрез офиолитов – это реститы от экстракции базальтовых расплавов. Вместе с тем, почти все исследователи, изучавшие месторождения хрома, считали, что они обладают «кумулятивными характеристиками» и, таким образом, задача выяснения генезиса хромититов была сведена к тому, каким образом «кумулятивные» хромититы оказались в реститовой мантии [Johnson, 2012].

В ранних «офиолитовых моделях» залежи хромовых руд рассматривались как автолиты, сформированные при аккумуляции кристаллизованных хромититов в пакетах магмы около основания коровых кумулятов [Dickey, 1975; Greenbaum, 1977]. По мнению [Dickey, 1975] концентрации хромита погружались внутрь нижележащих реститовых перидотитов, что обусловлено большей плотностью хромититов относительно окружающих кумулятивных перидотитов. Подобным образом предполагалось, что сегрегации хромитов были внедрены в нижележащие перидотиты путем «плотного сгибания» [Greenbaum, 1977]. Обе модели были отвергнуты из-за структурных ограничений [Cassard et al., 1981]. Предложенные модели потерпели неудачу при попытке объяснить присутствие дунитовой оболочки вокруг хромититов. Позднее было принято, что сосуществование оливина и хромита в мантии вызвано ранней стадией фракционирования пикритовых расплавов, которые поднимались сквозь верхнюю мантию палеоспрединого центра [Brown, 1980; и др.].

В 1980–90-х гг. предприняты исследования физико-химических условий образования расплавов, которые мигрируют сквозь мантию, чтобы понять их влияние на отложение и состав хромита [Zhou et al., 1996; и др.], а также роли летучих компо-

нентов и флюидов в кристаллизации хромита. Ниже приведены примеры предложенных моделей для объяснения генезиса офиолитовых хромититов.

Гипотеза хромитовых даек интерпретирует подиформные хромититы как продукт ранней стадии кристаллизации хромита из базальтовой магмы, мигрирующей сквозь фокусированные каналы в мантии. Предполагалось, что хромит образуется посредством фракционной кристаллизации поднимающейся магмы в периодически пополняемых мелких магматических камерах, расположенных под главной кумулятивной магматической камерой, внутри мантийных гарцбургитов [Brown, 1980].

Среди прочих гипотез было также предложено *многостадийное смешение расплавов*, близких по составу к бонинитам и фертильных, близких к MORB, продуцированных при многостадийном плавлении и сепарации расплавов в мантии. Модель смешения магм основана на экспериментах, комбинирующих пикритовый расплав с бонинитовым расплавом [Ballhaus, 1998]. Было показано, что вязкость позволяет избежать мгновенного смешения расплавов, и что хромитовый кумулус может зарождаться и расти только в мафическом расплаве, где поверхностная энергия между хромитом и расплавом минимальна. В экспериментах силикатный расплав действовал как диффузивный резервуар хрома и было показано, что самые богатые хромитовые руды могли бы формироваться, когда объемное отношение расплава, производящего хромит, незначительно по отношению ко всему объему расплава. Результатами проведенных экспериментов стало воспроизведение в микромасштабе некоторых особенностей подиформных хромититов, в частности, нодулярных текстур и дунитовых оболочек вокруг хромита. Вместе с тем, осталась нерешенной проблема «пустого пространства», которое необходимо создать в условиях высоких давлений внутри кристаллических мантийных перидотитов и условия полного удаления расплава.

Наиболее поздней моделью для объяснения генезиса офиолитовых хромититов является *модель реакции расплав-порода*. Она предполагает, что кристаллизация хромита – это результат реакции между мигрирующими примитивными расплавами и мантийным перидотитом, сквозь который он проходит [Kelemen, 1995 и др.]. В работе [Arai, Yurimoto, 1994] предположено, что расплав, сформированный на глубине в условиях более высокого давления, проникает внутрь мантийных гарцбургитов и реагирует с ними, растворяя ортопироксен и образуя дунит и вторичный богатый кремнеземом и хромом расплав. Затем последний смешивается с последующим пульсом относительно примитивного расплава и отлагает хромит. Считается также, что в этом процессе тела глиноземистых хромититов образуются, когда толеитовые расплавы (богатые алюминием) реагируют с лерцолитом или гарцбургитом, и высокохромистые поды формируются реакцией между гарцбургитом и бонинитом (богатым хромом) [Leblanc, 1995]. Кроме составов взаимодействующих расплавов и мантийных перидотитов важным фактором считается обширность взаимодействия расплав-порода, которая влияет на размер и количество подиформных хромититов [Zhou, Robinson, 1997].

Все «реакционные» модели образования дунитов с хромитовым оруденением предполагают постепенный переход существенно ортопироксеновых парагенезисов в мономинеральный оливиновый, но различными способами: путем «оливинизации» при проработке магнезиальными или «восстановленными» флюидами [Варлаков, 1978; Москалева, 1974; и др.] или путем реакции расплава базальтового или бонини-

того состава с перидотитом, ведущей к растворению пироксенов [Zhou et al., 1996; и др.]. В основе реакционно-магматических идей лежит тезис о том, что, поскольку мантийные расплавы не равновесны с реститовыми перидотитами, они должны перемещаться к поверхности по изолированным каналам, которые сейчас в офиолитовых комплексах представлены телами дунитов [Kelemen et al., 1995]. При этом считается, что гарцбургиты и дуниты офиолитовых комплексов являются не простыми тугоплавкими остатками от частичного плавления пиролита, а представляют собой результат реакции рестита с проникающими сквозь него расплавами, сгенерированными на большей глубине. Расплавы «расторгают» пироксены и «кристаллизуют» дополнительный оливин, что в предельном случае ведет к формированию дунитов. В некоторых интерпретациях дуниты считаются изолированными «каналами», по которым базальтовые расплавы транспортируются к поверхности [Kelemen et al., 1995]. Образование хромитов связывается исключительно с транспортировкой бонинитовых расплавов сквозь перидотиты, реакцией бонинитов с перидотитами, растворением пироксенов, осаждением оливина и высокохромистого шпинелида [Zhou et al., 1996; и др.].

Таким образом, в описанных выше моделях основным является реакция расплава с перидотитом, в результате которой из последнего удаляется пироксен и добавляются оливин и хромит. Авторы моделей считают достаточным доказательством своих предположений то, что вокруг хромитов всегда присутствует дунитовая оболочка. Вместе с тем, в данных построениях ничего не говорится о механизмах концентрации хромита после его отложения в дуните, поскольку баланс вещества при заявленном реакционном процессе показывает, что концентрация хромшпинелидов в образованном дуните не будет превышать первых процентов. Кроме того, для реализации предложенных выше моделей необходимо наличие постоянно поддерживающихся «троп», по которым должны поступать все новые порции расплава, постоянно отлагая новые порции хромшпинелидов, что позволяет усомниться в реалистичности предложенного сценария.

Альтернативным подходом при определении генезиса офиолитовых дунитов и хромитов является рассмотрение мантийных ультрамафитов как сплошной кристаллической среды, в результате перемещения которой посредством пластических деформаций («мантийного течения») происходит преимущественно механическая сортировка частиц различных фаз согласно их физическим свойствам. Основы данного подхода изложены в работах отечественных исследователей [Гончаренко, 1989; Щербаков, 1990; и др.]. В публикациях автора настоящей работы приведены примеры твердофазного образования хромитов в ходе деформации мантийных силикатов [Савельев и др., 2016; 2017]; разработана реоморфическая модель формирования рудных концентраций хромитов в мантийных ультрамафитах [Савельев, Федосеев, 2014], которая является логическим продолжением исследований, установивших тектоническую природу мантийного разреза офиолитовых комплексов. Вместе с тем, в рамках данного подхода нерешенными остаются частные вопросы, касающиеся соотношения пластического течения твердых ультрамафитов и проникающего сквозь них расплава, а также проблема количественных соотношений хромитов и вмещающих дунитов, которые варьируют в весьма значительном диапазоне.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания по теме № 0252-2017-0014.

Литература

- Варлаков А. С.* Генезис хромитового оруденения в альпинотипных гипербазитах Урала // Петрография ультраосновных и щелочных пород Урала. Свердловск, 1978. С. 63–82.
- Гончаренко А. И.* Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1989. 404 с.
- Кравченко Г. Г.* Роль тектоники при кристаллизации хромитовых руд Кемпирсайского плутона. М.: Наука, 1969. 232 с.
- Логинов В. П., Павлов Н. В., Соколов Г. А.* Хромитоносность Кемпирсайского ультраосновного массива на Южном Урале / Хромиты СССР. Т. 2. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. С. 5–199.
- Москалева С. В.* Гипербазиты и их хромитоносность. Л.: Недра, 1974. 279 с.
- Савельев Д. Е., Белогуб Е. В., Блинов И. А., Кожевников Д. А., Котляров В. А.* Петрологические свидетельства синдеформационной сегрегации вещества при образовании дунитов (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // Минералогия. 2016. № 4. С. 56–77.
- Савельев Д. Е., Пучков В. Н., Сергеев С. Н., Мусабилов И. И.* О деформационно-индуцированном распаде энстатита в мантийных перидотитах и его значении для процессов частичного плавления и хромитообразования // Доклады Академии наук. 2017. Т. 276. № 2. С. 200–204.
- Савельев Д. Е., Федосеев В. Б.* Пластическое течение и реоморфическая дифференциация вещества в мантийных ультрамафитах // Вестник Пермского университета. Геология. 2014. № 4. С. 22–41.
- Щербатов С. А.* Пластические деформации ультрабазитов офиолитовой ассоциации Урала. М.: Наука, 1990. 120 с.
- Arai S., Yurimoto H.* Podiform chromitites from the Tari-Misaka ultramafic complex, southwestern Japan, as a melt mantle interaction products // Economic Geology. 1994. Vol. 89. P. 1279–1288.
- Ballhaus C.* Origin of the podiform chromite deposits by magma mingling // Earth and Planetary Science Letters. 1998. Vol. 156. № 3–4. P. 185–193.
- Brown M. A.* Textural and geochemical evidence for the origin of some chromite deposits in the Oman ophiolite / Ophiolites, Proceedings of International Ophiolite Symposium, Cyprus. Geol. Surv. Dep., Nicosia, Ed. A. Panayiolou, 1980. P. 714–721.
- Cassard D., Nicolas A., Rabinowitch M., Moutte J., Leblanc M., Prinzhofer A.* Structural Classification of chromite pods in Southern New Caledonia // Economic Geology. 1981. Vol. 76. P. 805–831.
- Dickey J. S.* A hypothesis of origin for podiform chromite deposits / Chromium: its physicochemical behavior and petrologic significance, 1975. P. 1061–1074.
- Greenbaum D.* The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus // Economic Geology. 1977. Vol. 72. P. 1175–1194.
- Johnson C.* Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan. Ph. D. thesis, Cardiff University, 2012. 468 p.
- Kelemen P. B., Shimizu N., Salters V. J. M.* Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels // Nature. 1995. Vol. 375. P. 747–753.
- Leblanc M.* Chromitite and ultramafic rock compositional zoning through a paleotransform fault, Poum, New Caledonia // Economic Geology. 1995. Vol. 90. P. 2028–2039.
- Thayer T. P.* Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guleman-Soridag District, Turkey // Economic Geology. 1964. Vol. 59. P. 1497–1524.
- Zhou M.-F., Robinson P. T.* Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits // Economic Geology. 1997. Vol. 92. P. 259–262.
- Zhou M.-F., Robinson P. T., Malpas J., Li Z.* Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle // Journal of Petrology. 1996. Vol. 37. № 1. P. 3–21.