

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ВЗГЛЯДОВ НА ГЕНЕЗИС ПОДИФОРМНЫХ ХРОМИТИТОВ

© Савельев Дмитрий Евгеньевич,

ГБНУ «Академия наук Республики Башкортостан»,

Институт геологии ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр
Российской Академии наук», г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. В статье проведен обзор эволюции взглядов на генезис дунитов и хромититов офиолитовых комплексов, так называемых «подиформных месторождений хрома». Показано, что ни одна из предложенных гипотез до настоящего времени не смогла объяснить некоторые закономерности строения подиформных месторождений. Среди них наиболее важными являются следующие: постоянная приуроченность рудных скоплений к дунитам, локализация вкрапленных руд в мощных дунитовых телах, тогда как массивные хромититы обычно отделяются от перидотитов небольшой по мощности дунитовой оторочкой. На смену ранним ортомагматическим взглядам пришли сначала метасоматические, а затем комбинированные модели, которые включали в себя элементы магматического и метасоматического способа образования. Несмотря на то, что многие усилия были предложены для разработки реакционно-магматических моделей, констатируется, что в них отсутствует механизм образования хромититов как геологических тел. Понимание данного факта заставляет многих исследователей, сторонников “реакционной модели”, при объяснении генезиса хромовых руд прибегать к различным другим механизмам. В цитируемых работах предлагаются разработанные ранее модели “смещения магм”, наряду с “реакционной гипотезой”. Однако применение к мантийным ультрамафитам моделей “смещения магм” для формирования хромовых руд сталкивается с проблемой “свободного пространства”, которое необходимо для осаждения больших объемов руд, но которое отсутствует в весьма низко-пористой кристаллической верхней мантии. Автором приведены примеры твёрдофазного образования хромшпинелидов в ходе деформации мантийных силикатов и предложен реоморфический механизм формирования хромититовых тел, в рамках которого могут быть преодолены проблемы существующих гипотез образования хромовых руд в офиолитовых комплексах.

Ключевые слова: ультрамафиты, офиолиты, хромшпинелиды, дуниты, подиформные хромититы, оливин, частичное плавление, пластическая деформация

ABOUT DEVELOPMENT OF POINTS OF VIEW ON THE PODIFORM CHROMITITE ORIGIN

© Saveliev Dmitry Evgenievich,

State budgetary scientific institution

«Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan»,

Institute of Geology FGBNU "Ufa Federal Research Center"

Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

Summary. The article reviews the evolution of views on the genesis of dunites and chromitites of ophiolite complexes, the so-called "podiform chromium deposits". It is shown that none of the proposed hypotheses has so far been able to explain some regularities in the structure of

podiform deposits. Among them, the most important are the following: the constant location of ore accumulations in dunites, the localization of disseminated ores in thick dunite bodies, while massive chromitites are usually separated from peridotites by a thin dunite envelope. The former orthomagmatic views were replaced first by metasomatic and then by combined models, which included elements of the magmatic and metasomatic modes of formation. Despite the fact that many efforts have been made to develop reaction-magmatic models, it is stated that they lack a mechanism for the formation of chromitites as geological bodies. Understanding this fact makes many researchers, supporters of the "reaction model", resort to various other mechanisms when explaining the genesis of chromium ores. In the cited papers, previously developed models of "magma mixing" are proposed along with the "reaction hypothesis". However, the application of "magma mixing" models to mantle ultramafic rocks to form chromium ores runs into the problem of "free space", which is necessary for the deposition of large volumes of ores, but which is absent in the very low-porosity crystalline upper mantle. The author gives examples of solid-phase formation of chrome spinels during the deformation of mantle silicates and proposes a rheomorphic mechanism for the formation of chromite bodies, within which the problems of existing hypotheses of the formation of chromium ores in ophiolite complexes can be overcome.

Key words: ultramafic rock, ophiolite, Cr-spinel, dunite, podiform chromitite, olivine, partial melting, plastic deformation

Введение. 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). 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 [1]. При этом большинство исследователей считало, что формирование разреза самих гипербазитовых массивов происходило в результате кристаллизационной дифференциации [2, 3]. Часть сторонников магматической гипотезы большое значение в образовании рудных концентраций придает расслоению ультраосновного расплава (ликвации) на дунитовую и перидотитовую составляющие [4, 5].

Некоторые исследователи предполагали, что мантийные ультрабазиты внедрились в виде "кристаллической каши", внутри которой хромититы находились в кристаллическом состоянии [6, 7]. В работах Тэйера [7] предположено, что хромиты сформировались путем аккумуляции из магмы в нижней коре и верхней мантии, а в работе [8] указано, что они в последствии

могли быть погружены внутрь «кристаллической каши» подстилающих ультрамафитов.

Развитие метасоматической гипотезы [9-11], рассматривающей дунит-гарцбургитовые комплексы с хромовым оруденением как продукт метасоматических преобразований перидотитового (энстатититового) субстрата, было вызвано главным образом 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 подиформные 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 [12, 13]. 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 [14]. Попытки создать модель привели к тому, что хромититы рассматривались автолитами, сформированными от аккумуляции кристаллизованных хромититов в пакетах магмы около основания коровых кумулятов [8, 15].

По мнению Dickey [8] концентрации хромита погружались внутрь нижележащих реститовых перидотитов, что обусловлено большей плотностью хромититов относительно окружающих кумулятивных перидотитов. Подобным образом Greenbaum [15] предположил, что сегрегации хромитов были внедрены в нижележащие перидотиты путем «плотного сгибания». Обе модели были отвергнуты из-за структурных ограничений [16]. Кроме того, предложенные модели потерпели неудачу при попытке разрешить вариации отношения Cr/Fe в хромите с глубиной во многих офиолитах [17, 18] или 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 палео-спредингового центра [17, 19].

В 1980-90-х годах были предприняты интенсивные исследования физико-химических условий образования расплавов, которые мигрируют сквозь мантию, чтобы понять их влияние на отложение и состав хромита [20, 21]. Исследовалась также роль в кристаллизации хромита летучих компонентов и флюидов [22, 23]. 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 [16-18, 19,24]. В работе [17] было предположено, что хромит образован посредством фракционной кристаллизации поднимающейся магмы в периодически пополняемых мелких магматических камерах, расположенных под главной кумулятивной магматической камерой, внутри мантийных гарцбургитов.

В работе [19] смоделировано отложение и аккумуляция хромита внутри каналов для проходящего сквозь мантийный диапир базальтового расплава под срединно-океаническим хребтом. Результаты моделирования показали, что мигрирующий расплав может взаимодействовать с перидотитом и производить дунит. Однако для того, чтобы образовать залежь хромитита, необходимы «расширения» магматического канала» и «полости», где расплав мог конвектировать и осаждать хромит. Авторы не обратили внимания на тот факт, что образование подобных «расширений» вряд ли возможно в условиях высоких давлений в поднимающемся мантийном диапире, о чем, например, свидетельствуют «напряженные» деформационные структуры перидотитов и дунитов. Кроме того, необходимым является полное удаление расплава, поскольку в подавляющем большинстве случаев в ассоциации с рудным хромитом находится только высокомагнезиальный оливин.

По мнению авторов рассмотренной модели, канал расплава изначально срезает структуру мантийных перидотитов и на этом основании они вывели, что первичные, ненарушенные месторождения хромититов являются дискордантными. Это положение до настоящего времени широко используется зарубежными исследователями при интерпретации полевых геологических данных. Считается почти общепринятым, что конкордантность месторождений к структурам вмещающих перидотитов (линоватости и полосчатости) всегда указывает на последующую тектоническую деформацию [25]. Среди редких исключений следует отметить работы Хока [26], изучавшего месторождения Филиппин и высказавшего противоположную трактовку структур хромититов. Он считает, что конкордантные месторождения менее деформированными по сравнению с дискордантными хромититами типа «string-of-pods».

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. Бальхаус предложил модель смешения магм [27], основанную на экспериментах, комбинирующих пикритовый расплав с бонинитовым расплавом. Он показал, что вязкость позволяет избежать мгновенного смешения расплавов, и что хромитовый кумулус может зародиться 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, следует отметить, что осталась нерешенной проблема «пустого пространства», которое необходимо создать в условиях высоких давлений внутри кристаллических мантийных перидотитов и условия полного удаления расплава.

Многие критики «гипотезы хромититовых даек» или «смешения расплавов» указывают на такой недостаток данной модели, как невысокое содержание хрома в базальтовых расплавах (обычно <500 ppm). По их мнению, оно недостаточно, чтобы произвести значимые количества хромитов, формирующихся до начала доминирующей кристаллизации силикатов [20]. Также указывается, что для формирования обширных горизонтов хромититов, хромит должен кристаллизоваться без силикатных фаз, то есть необходим механизм, чтобы состав расплава вел внутрь ликвидусного поля хромита. Вместе с тем, на смену данной модели приходит «бонинитовая», где содержание хрома выше в 3-5 раз, что принципиально не может изменить ситуацию с проблемой образования таких крупных скоплений массивных хромититов, как подиформные тела Кемпирская или некоторых других месторождений мира.

Различными исследователями был рассмотрен вопрос о том, какое количество расплава потребуется для того, чтобы сформировать типичное хромитовое месторождение [24, 28], исходя из того, что хром – малый элемент и его содержание в расплавах типа MORB составляет 200-700 ppm, а в бонинитах 1000-1500 ppm. Предполагая полное удаление хрома из расплава, чтобы образовать хромитит, Leblanc and Ceuleneer [24] подсчитали, чтобы образовать месторождение в 3000 тонн (эквивалент к 900 т хрома) требуется объем расплава как минимум в 300-400 раз больший, чем объем конечного тела хромитита. Подобные расчеты проведены в работе [28], определено, что необходимый объем расплава должен быть как минимум в 300 раз больше, чем объем руды. Все сказанное выше говорит о том, что для извлечения необходимого количества хрома требуется существенный объем расплава, не говоря уже о проблемах, связанных с уменьшением проницаемости дунита, все более насыщаемого плотными кристаллами хромита.

Наиболее поздней моделью для объяснения генезиса офиолитовых хромититов является «*модель реакции расплав-порода*». Она предполагает, что кристаллизация хромита результирует от реакции между мигрирующими примитивными расплавами и мантийным перидотитом, сквозь который он перколирует [29-31]. В работе [30] предположено, что расплав, сформированный на глубине в условиях более высокого давления, перколирует 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) [31-33]. Кроме составов взаимодействующих расплавов и мантийных перидотитов, важным фактором считается обширность взаимодействия расплав-порода, которая влияет на размер и количество подиформных хромититов [34].

В большей части гипотез, предложенных для объяснения генезиса офиолитовых хромититов, отдельно рассматриваются механизмы образования *массивных хромититов*. Поскольку во всех рассмотренных выше моделях предполагается кристаллизация хромита в присутствии значительных количеств расплава, то их авторы тщательно подбирают необходимые условия для сценария, при котором из расплава кристаллизуется только хромит, либо разрабатывают механизмы посткристаллизационного концентрирования хромита (отделения его от оливина и остаточного расплава). В качестве механизмов «уплотнения» с целью получить в результате массивные хромититы были предложены «механическая сепарация» [19], «посткумулясная реакция с богатой хромом жидкостью» или «нарастание» (overgrowth), «компакция/синтеринг» [35-37] и деформация [38]. В работе [14] проведен обзор этих гипотез и приведены убедительные структурные аргументы в пользу реалистичности протекания в офиолитовых хромититах процессов, близких к известному технологическому процессу спекания («синтеринга»), используемому в порошковой металлургии в сочетании с пластической деформацией руд.

Все «реакционные» модели образования дунитов с хромитовым оруденением предполагают постепенный переход существенно ортопироксеновых парагенезисов в мономинеральный оливиновый, но различными способами: путём «оливинизации» при проработке магнезиальными или «восстановленными» флюидами [10, 39, 40] или путём реакции расплава базальтового или бонинитового состава с перидотитом, ведущей к растворению пироксенов [21, 41, 42]. В основе реакционно-магматических идей лежит тезис о том, что поскольку мантийные расплавы не равновесны с реститовыми перидотитами, то они должны были перемещаться к поверхности по изолированным каналам, которые представлены в настоящее время в офиолитовых комплексах телами дунитов [42]. 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,

генерированными 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 [42]. Образование хромитов связывается исключительно с транспортировкой сквозь перидотиты бонинитовых расплавов, реакцией бонинитов с перидотитами, растворением пироксенов, осаждением оливина и высокохромистого шпинелида [21]. Для подтверждения справедливости выдвинутого тезиса авторами многочисленных публикаций (например, [43, 44]) приводятся преимущественно геохимические данные, слабо или вовсе не связанные с особенностями внутренней структуры пород.

Как отмечено выше, в реакционно-магматической модели отсутствует механизм образования хромитов как геологических тел. Понимание данного факта заставляет многих исследователей, сторонников “реакционной модели”, при объяснении генезиса хромовых руд прибегать к различным другим механизмам (например, [45, 46]). В цитируемых работах предлагаются разработанные ранее модели “смещения магм” [19, 24, 27], наряду с “реакционной гипотезой”. Однако применение к мантийным ультрамафитам моделей “смещения магм” для формирования хромовых руд сталкивается с проблемой “свободного пространства”, которое необходимо для осаждения больших объемов руд, но которое отсутствует в весьма низко-пористой кристаллической верхней мантии.

Таким образом, в описанных выше моделях основным является реакция расплавов 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 [47]. 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 расплавов, постоянно отлагая новые порции хромшпинелидов, что позволяет усомниться в реалистичности предложенного сценария.

Одной из проблем данного построения является то, что с увеличением содержания хромита (наиболее плотной и твердой фазы), проницаемость «тропы» должна снижаться, по сравнению с соседними участками без хромита и с более удаленными участками перидотита, где расплав может мигрировать путем «реакционного порового течения». Еще одна проблема – необходимость всегда полного удаления расплава, чтобы получить соответствие с

геологическими данными: хромититы всегда залегают в дунитах, где кроме оливина нет других фаз. В рамках реакционной гипотезы трудно объяснить часто наблюдаемые резкие контакты дунитов и гарцбургитов, а также увеличение содержания ортопироксена в приконтактовых частях гарцбургитов, что очень часто наблюдается в офиолитовых массивах.

Альтернативным подходом при определении генезиса офиолитовых дунитов и хромититов 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 [48-51]. В публикациях автора приведены примеры твёрдофазного образования хромшпинелидов в ходе деформации мантийных силикатов [52, 53] разработана реоморфическая модель формирования рудных концентраций хромшпинелидов в мантийных ультрамафитах [54, 55], которая является логическим продолжением исследований, установивших тектоническую природу мантийного разреза офиолитовых комплексов. Вместе с тем, в рамках данного подхода нерешенными остаются многие вопросы, касающиеся соотношения пластического течения твердых ультрамафитов и проникающего сквозь них расплава, а также проблема количественных соотношений хромититов и вмещающих дунитов, которые варьируют в весьма значительном диапазоне.

***Финансирование:** исследование выполнены в рамках темы Госзадания №FMRS–2022–0011.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетехтин А.Г. Шорджинский хромитоносный перидотитовый массив (Закавказье) и генезис месторождений хромистого железняка вообще / Хромиты СССР. Т. 1. М.; Л.: Наука, 1937. С. 7–156.
2. 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.
3. Соколов Г.А. Хромиты Урала, их состав, условия кристаллизации и закономерности распространения / Труды / ИГН АН СССР; Вып. 97; Сер. рудн. м-ний; № 12. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 128 с.
4. Кравченко Г.Г. Роль тектоники при кристаллизации хромитовых руд Кемпирсайского плутона. М.: Наука, 1969. 232 с.
5. Павлов Н.В., Григорьева И.И., Гришина Н.В. Образование и генетические типы хромитовых месторождений геосинклинальных областей / Условия образования магматических рудных месторождений. М.: Наука, 1979. С. 5–78.

6. Bowen N.L., Tuttle O.F. The system MgO - SiO₂ - H₂O // Geol. Soc. Amer. Bull., 1949, V. 60. Pp. 439–460.
7. Thayer T. P. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guleman-Soridag District, Turkey. // Econ. Geol., 1964, V. 59. Pp. 1497–1524.
8. Dickey J.S. A hypothesis of origin for podiform chromite deposits / Chromium: its physicochemical behavior and petrologic significance, 1975. Pp.1061-1074.
9. Бакиров А.Г. О происхождении дунитов и хромитов Кемпирсайского массива // Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Свердловск, 1963. С. 325–330.
10. Москалёва С.В. Гипербазиты и их хромитоносность. Л.: Недра, 1974. 279 с.
11. Савельев А.А. Хромиты Войкаро-Сыньинского массива / Генезис ультрабазитов и связанного с ними оруденения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. С. 63–77.
12. Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 585 с.
13. Greenbaum, D. Magmatic processes at ocean ridges: evidence from the Troodos Massif, Cyprus // Nature, 1972, V. 238. Pp. 18–21.
14. Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan. Ph.D. thesis, Cardiff University, 2012. 468 p.
15. Greenbaum D. The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus // Econ.Geol., 1977, V. 72. Pp. 1175–1194.
16. Cassard D., Nicolas A., Rabinowitch M., Moutte J., Leblanc M., Prinzhofer A. Structural Classification of Chromite Pods in Southern New Caledonia // Econ. Geology, 1981, V. 76. Pp. 805–831.
17. Brown M.A. Textural and geochemical evidence for the origin of some chromite deposits in the Oman ophiolite / Ophiolites, Proceed. Intern. Ophiolite Symp., Cyprus. Geol. Surv. Dep., Nicosia A. Ed. Panayiolou, 1980. Pp. 714–721.
18. Leblanc M. Chromite in oceanic arc environment: New Caledonia. In: Stowe, C. W. (ed.) Evolution of Chromium Ore Fields. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1987. Pp. 265–296.
19. Lago B.L., Rabinowicz M., Nicolas A. Podiform chromite ore bodies: a genetic model // J. Petrology, 1982, V. 23. Pp. 103–125.
20. Roeder P.L., Reynolds I. Crystallisation of chromite and chromium solubility in basaltic melts // J. Petrology, 1991. V. 32. Pp. 909–934.
21. 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 // J. Petrology. 1996. V. 37. № 1. Pp. 3–21.
22. Matveev S. Ballhaus C. Role of water in the origin of podiform chromitite deposits // Earth Planet. Sci. Lett. 2002. V. 203. Pp. 235–243.

23. McElduff B., Stumpfl E. F. The chromite deposits of the Troodos Complex, Cyprus: evidence for the role of a fluid phase, accompanying chromite formation // *Mineralium Deposita*, 1991, V. 26. Pp.307–318.
24. Leblanc M., Ceuleneer G. Chromite crystallization in a multicellular magma flow: evidence from a chromitite dike in the Oman ophiolite // *Litos*. 1992. V. 27. Pp. 231–257.
25. Nicolas A. Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1989. 367 p.
26. Hock M., Friedrich G. Structural features of ophiolitic chromitites in the Zambales Range, Luzon, Philippines // *Mineralium Deposita*, 1985, V. 20. Pp. 290–301.
27. Ballhaus C. Origin of the podiform chromite deposits by magma mingling // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, V. 156, № 3–4. Pp. 185–193.
28. Auge T. Chromite deposits in the northern Oman ophiolite: mineralogical constraints // *Mineral. Deposita*, 1987, V. 22. Pp. 1–10.
29. Kelemen P.B. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma. I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite // *J. Petrology*, 1990, V.31. Pp. 51–98.
30. Arai S., Yurimoto H. Podiform chromitites from the Tari-Misaka ultramafic complex, southwestern Japan, as a melt mantle interaction products // *Econ Geol.*, 1994, V.89. Pp. 1279–1288.
31. Zhou M.F., Robinson P.T., Bai W.J. Formation of podiform chromites by melt/rock interaction in the upper mantle // *Mineralium Deposita*, 1994, V. 29. Pp. 98-101.
33. Leblanc M. Chromitite and ultramafic rock compositional zoning through a paleotransform fault, Poum, New Caledonia // *Economic Geology*, 1995. V.90. Pp.2028–2039.
33. Rollinson H. Chromite in the mantle section of the Oman ophiolite: a new genetic model // *The Island Arc*, 2005, V. 14. Pp. 542–550.
34. Zhou M-F, Robinson P.T. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits // *Econ. Geol.*, 1997, V. 92. Pp. 259–262.
35. Golding H.G. Relict textures of chromitite from New South Wales // *Geol. Soc. Australia. J.*, 1975, V. 22. Pp.397–412.
36. Hulbert L.J., Gruenewaldt G. Textural and compositional features of chromite in the Lower and Critical zones of the Bushveld Complex south of Potgietersrus *Econ Geol.*, 1985. V. 80. Pp. 872–895.
37. Voll G. New work on petrofabrics // *Geol. J.*, 1960. V. 2. Pp. 502–597.
38. White J.C., White S.H. The structure of grain boundaries in tectonites // *Tectonophysics*, 1981, V.78. Pp. 613–628.
39. Варлаков А.С. Генезис хромитового оруденения в альпинотипных гипербазитах Урала // *Петрография ультраосновных и щелочных пород Урала*. Свердловск, 1978а. С. 63—82.

40. Чашухин И.С., Вотяков С.Л. Поведение элементов семейства железа, оксибарометрия и генезис уникальных хромитовых месторождений Кемпирсайского массива // Геол. рудных месторожд. 2009. Т. 51. № 2. С. 140–156.
41. Батанова В.Г., Савельева Г.Н. Миграция расплавов в мантии под зонами спрединга и образование дунитов замещения: обзор проблемы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 9. С. 992–1012.
42. 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, V. 375. Pp. 747–753.
43. Gonzalez-Jimenez J.M., Proenza J.A., Gervilla F., Melgarejo J.C., Blanco-Moreno J.A., Ruiz-Sanchez R., Griffin W.L. High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tanamo district, Mayari-Cristal ophiolitic massif (eastern Cuba): Constrains on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum-group-elements // Lithos. 2011, V. 125. Pp. 101-121.
44. Gonzalez-Jimenez J.M., Griffin W.L., Proenza A., Gervilla F., O'Reilly S.Y., Akbulut M., Pearson N.J., Arai S. Chromitites in ophiolites: how, where, when, why? Part II. The crystallisation of chromitites // Lithos. 2014. V. 189. P. 148–158.
45. Zhou M.-F., Robinson P.T., Malpas J., Aitchison J., Sun M., Bai W.J., Hu X.F., Yang J.S. Melt/rock interaction and melt evolution in the Sartohay high-Al chromite deposit of the Dalabute ophiolite (NW China) // J. Asian Earth Sci., 2001, V. 19. Pp.519–536.
46. Miura M., Arai S., Ahmed A.H., Mizukami T., Okuno M., Yamamoto S. Podiform chromitite classification revisited: a comparison of discordant and concordant chromitite pods from Wadi Hilti, northern Oman ophiolite // J. of Asian Earth Sci.. 2012. V.59. Pp. 52–61.
47. Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // Chemical Geology, 1994, V. 113. Pp.191–204.
48. Гончаренко А.И. Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1989. 404 с.
49. Кутолин В.А. Перекристаллизация вещества верхней мантии и ее металлогенические следствия / Мантийные ксенолиты и проблема ультраосновных магм. Новосибирск: Наука, 1983. С.17-22.
50. Чернышов А.И. Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность). Томск, 2001. 215 с.
51. Щербаков С.А. Пластические деформации ультрабазитов офиолитовой ассоциации Урала. М.: Наука, 1990. 120 с.
52. 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.

53. 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 // ДАН, 2017, Т.276, №2. С. 200–204.
54. Савельев Д.Е., Федосеев В.Б. Сегрегационный механизм формирования тел хромитов в ультрабазитах складчатых поясов // Руды и металлы, 2011, №5. С.35–42.
55. Савельев Д.Е., Федосеев В.Б. Пластическое течение и реоморфическая дифференциация вещества в мантийных ультрамафитах // Вестник Пермского университета. Геология. 2014. № 4. С. 22–41.

REFERENCES

1. Betekhtin A.G. Shordginsky chromite-bearing peridotite massif (Transcaucasia) and chromitite genesis / *Khromity SSSR*. V. 1. Moscow-Leningrad: Nauka, 1937. Pp. 7–156. (in Russian)
2. Loginov V.P., Pavlov N.V., Sokolov G.A. Chromitebearingness of Kempirsai ultrabasic massif on the Southern Urals / *Khromity SSSR*. V. 2. Moscow-Leningrad: Nauka, 1940. Pp.5–199. (in Russian)
3. Sokolov G.A. Chromites of Urals: composition, condition of crystallization and regularities of distribution / *Trudy IGN AN SSSR*; V. 97; *Seria Rudnykh mestorozhdenii*. No 12. Moscow, 1948. 128 p. (in Russian)
4. Kravchenko G.G. A role of tectonic in crystallization of chromite ore of Kempirsai massif. Moscow: Nauka, 1969. 232 p. (in Russian)
5. Pavlov N.V., Grigorieva I.I., Grishina N.V. Formation and genetic types of chromite deposits of geosynclinal regions / *Usloviya obrazovaniya magmaticheskikh rudnykh mestorozhdenii*. Moscow: Nauka, 1979. Pp. 5–78. (in Russian)
6. Bowen N.L., Tuttle O.F. The system MgO - SiO₂ - H₂O // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1949, V. 60. Pp. 439–460.
7. Thayer T. P. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guleman-Soridag District, Turkey. // *Econ. Geol.*, 1964, V. 59. Pp. 1497–1524.
8. Dickey J.S. A hypothesis of origin for podiform chromite deposits / *Chromium: its physicochemical behavior and petrologic significance*, 1975. Pp.1061-1074.
9. Bakirov A.G. About origin of dunite and chromite of Kempirsai massif // *Magmatism, metamorfism, metallogeniya Urala*. Sverdlovsk, 1963. P. 325–330. (in Russian)
10. Moskalyova S.V. Hyperbasic rocks and their chromitebearingness. Leningrad: Nedra, 1974. 279 p. (in Russian)

11. Saveliev A.A. Chromites of Voikar-Synya massif / Genesis ultrabazitov I svyazannogo s nimi orudneniya. Sverdlovsk, 1977. Pp. 63–77. (in Russian)
12. Ringwood A.E. Composition and petrology of Earth mantle. Moscow: Nedra, 1981. 585 p. (in Russian, translated from English)
13. Greenbaum, D. Magmatic processes at ocean ridges: evidence from the Troodos Massif, Cyprus // Nature, 1972, V. 238. Pp. 18–21.
14. Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan. Ph.D. thesis, Cardiff University, 2012. 468 p.
15. Greenbaum D. The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus // Econ.Geol., 1977, V. 72. Pp. 1175–1194.
16. Cassard D., Nicolas A., Rabinowitch M., Moutte J., Leblanc M., Prinzoffer A. Structural Classification of Chromite Pods in Southern New Caledonia // Econ. Geology, 1981, V. 76. Pp. 805–831.
17. Brown M.A. Textural and geochemical evidence for the origin of some chromite deposits in the Oman ophiolite / Ophiolites, Proceed. Intern. Ophiolite Symp., Cyprus. Geol. Surv. Dep., Nicosia A. Ed. Panayiolou, 1980. Pp. 714–721.
18. Leblanc M. Chromite in oceanic arc environment: New Caledonia. In: Stowe, C. W. (ed.) Evolution of Chromium Ore Fields. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1987. Pp. 265–296.
19. Lago B.L., Rabinowicz M., Nicolas A. Podiform chromite ore bodies: a genetic model // J. Petrology, 1982, V. 23. Pp. 103–125.
20. Roeder P.L., Reynolds I. Crystallisation of chromite and chromium solubility in basaltic melts // J. Petrology, 1991. V. 32. Pp. 909–934.
21. 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 // J. Petrology. 1996. V. 37. № 1. Pp. 3–21.
22. Matveev S. Ballhaus C. Role of water in the origin of podiform chromitite deposits // Earth Planet. Sci. Lett. 2002. V. 203. Pp. 235–243.
23. McElduff B., Stumpfl E. F. The chromite deposits of the Troodos Complex, Cyprus: evidence for the role of a fluid phase, accompanying chromite formation // Mineralium Deposita, 1991, V. 26. Pp.307–318.
24. Leblanc M., Ceuleneer G. Chromite crystallization in a multicellular magma flow: evidence from a chromitite dike in the Oman ophiolite // Litos. 1992. V. 27. Pp. 231–257.
25. Nicolas A. Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1989. 367 p.
26. Hock M., Friedrich G. Structural features of ophiolitic chromitites in the Zambales Range, Luzon, Philippines // Mineralium Deposita, 1985, V. 20. Pp. 290–301.
27. Ballhaus C. Origin of the podiform chromite deposits by magma mingling // Earth Planet. Sci. Lett., 1998, V. 156, № 3–4. Pp. 185–193.

28. Auge T. Chromite deposits in the northern Oman ophiolite: mineralogical constraints // *Mineral. Deposita*, 1987, V. 22. Pp. 1–10.
29. Kelemen P.B. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma. I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite // *J. Petrology*, 1990, V.31. Pp. 51–98.
30. Arai S., Yurimoto H. Podiform chromitites from the Tari-Misaka ultramafic complex, southwestern Japan, as a melt mantle interaction products // *Econ Geol.*, 1994, V.89. Pp. 1279–1288.
31. Zhou M.F., Robinson P.T., Bai W.J. Formation of podiform chromites by melt/rock interaction in the upper mantle // *Mineralium Deposita*, 1994, V. 29. Pp. 98–101.
33. Leblanc M. Chromitite and ultramafic rock compositional zoning through a paleotransform fault, Poom, New Caledonia // *Economic Geology*, 1995. V.90. Pp. 2028–2039.
33. Rollinson H. Chromite in the mantle section of the Oman ophiolite: a new genetic model // *The Island Arc*, 2005, V. 14. Pp. 542–550.
34. Zhou M-F, Robinson P.T. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits // *Econ. Geol.*, 1997, V. 92. Pp. 259–262.
35. Golding H.G. Relict textures of chromitite from New South Wales // *Geol. Soc. Australia. J.*, 1975, V. 22. Pp.397–412.
36. Hulbert L.J., Gruenewaldt G. Textural and compositional features of chromite in the Lower and Critical zones of the Bushveld Complex south of Potgietersrus *Econ Geol.*, 1985. V. 80. Pp. 872–895.
37. Voll G. New work on petrofabrics // *Geol. J.*, 1960. V. 2. Pp. 502–597.
38. White J.C., White S.H. The structure of grain boundaries in tectonites // *Tectonophysics*, 1981, V.78. Pp. 613–628.
39. Varlakov A.S. Chromite ore genesis in alpinotype hyperbasites of Urals // *Petrografiya ultrasnovnykh i schelochnykh porod Urala. Sverdlovsk*, 1978a. Pp. 63—82. (in Russian)
40. Chaschukhin I.S., Votyakov S.L. Behavior of elements of iron group, oxibarometry and genesis of unique chromite deposits of Kempirsai massif // *Geology of ore deposits*. 2009. V. 51. No 2. Pp. 140–156.
41. Batanova V.G., Savelieva G.N. Migration of melts in mantle beneath spreading zones and replacing dunite origin: overview of problem // *Geology and geophysics*. 2009. V. 50. No 9. Pp. 992–1012. (in Russian)
42. 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, V. 375. Pp. 747–753.
43. Gonzalez-Jimenez J.M., Proenza J.A., Gervilla F., Melgarejo J.C., Blanco-Moreno J.A., Ruiz-Sanchez R., Griffin W.L. High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tanamo district, Mayari-Cristal ophiolitic massif (eastern Cuba):

- Constrains on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum-group-elements // *Lithos*. 2011, V. 125. Pp. 101-121.
44. Gonzalez-Jimenez J.M., Griffin W.L., Proenza A., Gervilla F., O'Reilly S.Y., Akbulut M., Pearson N.J., Arai S. Chromitites in ophiolites: how, where, when, why? Part II. The crystallisation of chromitites // *Lithos*. 2014. V. 189. Pp. 148–158.
 45. Zhou M.-F., Robinson P.T., Malpas J., Aitchison J., Sun M., Bai W.J., Hu X.F., Yang J.S. Melt/rock interaction and melt evolution in the Sartohay high-Al chromite deposit of the Dalabute ophiolite (NW China) // *J. Asian Earth Sci.*, 2001, V. 19. Pp. 519–536.
 46. Miura M., Arai S., Ahmed A.H., Mizukami T., Okuno M., Yamamoto S. Podiform chromitite classification revisited: a comparison of discordant and concordant chromitite pods from Wadi Hilti, northern Oman ophiolite // *J. of Asian Earth Sci.* 2012. V.59. Pp. 52–61.
 47. Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // *Chemical Geology*, 1994, V. 113. Pp.191–204.
 48. Goncharenko A.I. Deformation and petrostructural evolution of alpinotype hyperbasites. Tomsk: Tomsk university publishing, 1989. 404 p. (in Russian)
 49. Kutolin V.A. Recrystallization of upper mantle matter and metallogenic consequence of it / *Mantiinye ksenolity i problema ultrasnovnykh magm*. Novosibirsk: Nauka, 1983. Pp.17-22. (in Russian)
 50. Chernyshov A.I. Ultramafic rocks (plastic flow, structural and petrostructural heterogenic). Tomsk, 2001. 215 p. (in Russian)
 51. Scherbakov S.A. Plastic deformation of ultrabasites of ophiolitic assemblage of Urals . Moscow: Nauka, 1990. 120 p. (in Russian)
 52. Saveliev D.E., Belogub E.V., Blinov I.A., Kozhevnikov D.A., Kotlyarov V.A. Petrological evidences of syndeformation segregation of matter during dunite formation (on the example Kraka ophiolite, the Southern Urals) // *Mineralogiya*, 2016, No4. Pp.56-77. (in Russian)
 53. Saveliev D.E., Puchkov V.N., Sergeev S.N., Musabirov I.I. About deformation-induced decomposition of enstatite in the mantle peridotites and implication of it for partial meltin and chromitite formation processes // *Doklady of Earth Sciences*, 2017, V.276, No2. Pp. 200–204.
 54. Saveliev D.E., Fedoseev V.B. Segregation mechanism of chromitite body formation in the ultrabasic rock of folded belts // *Rudy i metally*, 2011, No5. Pp.35–42. (in Russian)
 55. Saveliev D.E., Fedoseev V.B. Plastic flow and rheomorphic differentiation of matter in the mantle ultramafic rocks // *Vestnik Permskogo Universiteta. Geologiya*. 2014. No 4. Pp. 22–41. (in Russian).

Сведения об авторах:

Савельев Дмитрий Евгеньевич, ведущий научный сотрудник Института геологии ФГБНУ «Уфимский федеральный исследовательский центр Российской Академии наук», доктор геолого-минералогических наук, профессор, 450006, г. Уфа, Российская Федерация ул. Карла Маркса, д. 16/2. E-mail: sav171@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8910-6992.

Author's personal details

Savelyev Dmitry Evgenievich, Leading Researcher, Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, 450006, Ufa, Russian Federation. st. Karl Marx, 16/2. E-mail: sav171@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8910-6992.

© Савельев Д.Е.