

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатилов О.А. Петрология и металлогения габбро-сиенитовых комплексов Алтае-Саянской области. М.: Наука, 1966. 240 с.
2. Грудинин М.И. Базит-гипербазитовый магматизм Байкальской горной области. Новосибирск: Наука, 1979. 156 с.
3. Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Ультраосновные и основные породы Южно-Муйской глыбы и ее обрамления (Северное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 1989. № 9. С. 32-38.
4. Грудинин М.И., Мазукабзов А.М., Демин И.А. Ультрабазит-базитовый магматизм обрамления Муйской глыбы (Средневитимская горная область) // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол. 2002. Т. 77. № 4. С. 77-86.
5. Ковалевский В.Е., Богнибов В.И., Глотов А.И., Прусевич А.А., Руднев С.Н. Жомболокский массив – новое проявление титаноносных габброидов в Восточном Саяне // Базитовые комплексы Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1983. С. 26-56.
6. Конников Э.Г. Титаноносные габброиды докембрия Северного Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1978. 118 с.
7. Прудовский Э.Л., Летягин В.С., Грудинин М.И. Габброидная формация Центральной Бурятии // Палеозойские магматические формации Байкальской горной области. Улан-Удэ, 1972. С. 109-125.
8. Смирнов С.М., Перельгина А.И. О некоторых основных чертах строения и рудоносности массивов основных и средних пород в хребте Моностой (Бурятская АССР) // Изв. высш. учебн. завед. Геология и разведка. 1959. № 6. С. 3-12.
9. Шабалин Л.И. Дифференцированный титаноносный габброидный массив Хаактыг-Ой // Магматические формации Сибири. Новосибирск: Наука, 1977. С. 80-89.
10. Цыганков А.А., Конников Э.Г. Геохимические типы и геодинамические условия становления габброидных комплексов восточной ветви Байкало-Муйского офиолитового комплекса // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 1. С. 19-30.

**МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЖИЛЬНЫХ ДУНИТОВ  
И СВЯЗАННОГО С НИМИ ОРУДЕНЕНИЯ  
(НА ПРИМЕРЕ МАССИВОВ КРАКА, ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

**Ковалев С.Г.**

*Институт геологии УНЦ РАН, Уфа, Россия*

*e-mail: kovalev@anrb.ru*

**THE MECHANISM OF THE VENOUS DUNITE  
AND RELATED CHROMITE ORE FORMATION  
(THE KRAKA MASSIF IN THE SOUTHERN URALS BY EXAMPLE)**

**Kovalev S.G.**

*Institute of Geology USC RAS, Ufa, Russia*

*e-mail: kovalev@anrb.ru*

The detailed study of the venous dunites and related chromite ores, spread in the Kraka massif, shows that their formation mechanism can be explained by the model of tectonic unloading in the local zones, where the incongruent melting of the orthopyroxene is realized. It is proved, that the mechanism of these zones of pressure unloading formation in mantle conditions is similar (but not identical) to the process of shear deformations in combination with break cracks in ductile-brittle systems.

Эволюция взглядов на происхождение дунитов и приуроченную к ним хромитовую минерализацию в целом определялась развитием учения о генезисе ультраосновных пород на основе разработки теоретических моделей, подтверждаемых экспериментальными исследованиями. В последние 10-15 лет, в процессе детального изучения хромитовых объектов южноуральских гипербазитовых массивов (Крака, Нурали, Миндяк) нами были получены материалы, позволяю-

щие предложить механизм образования жильных дунитовых тел и приуроченной к ним хромитовой минерализации.

Детальные исследования, проведенные в пределах массивов Крака, где на сегодняшний день известно свыше 200 мелких месторождений и рудопроявлений хромитов [1] показали, что значительная часть рудных объектов приурочена к дунитовым телам, имеющим «жилоподобную» и «дайкообразную» форму. Причем, данная ситуация не является уникальной, а кракинские объекты – «экзотическими». Аналогичны тела были выявлены во многих ультраосновных массивах [2]. Всем им, как правило, присущ ряд общих характеристик, сближающих их с кракинскими объектами. Размеры данных образований варьируют в широких пределах (от первых метров до 1 км и более по простиранию и до нескольких десятков метров по мощности), при этом масштабность оруденения, чаще всего, напрямую связана с размерами тела. Наиболее крупным и типичным объектом, относящимся к данному типу, является месторождение им. Менжинского. При изучении геологии месторождения особое внимание уделялось структурно-текстурным ориентировкам минеральных агрегатов пород, так как они характеризуют условия их образования и/или преобразования [5]. Ранее Г.Г. Кравченко [2], при изучении ориентированных текстур перидотитов и приуроченных к ним дунитовых тел с хромитовым оруденением, выделил три типа взаимоотношений между ними: 1) согласная и субсогласная направленность ориентированных текстур в перидотитах, рудовмещающих дунитах и хромитовых рудах; 2) ориентированные текстуры имеют секущий характер по отношению к псевдослоистости пород дунит-гарцбургитового комплекса и залеганию рудных тел; 3) ориентированные текстуры рудовмещающих дунитов и хромитового оруденения имеют субсогласный характер, но занимают секущее положение по отношению к окружающим их гарцбургитам. Нами на хромитовых объектах массивов Крака наблюдались все три типа структурных взаимоотношений между линейно-плоскостными ориентировками минеральных агрегатов, слагающих гарцбургиты, рудовмещающие дуниты и собственно руды. В большинстве случаев эти различия обусловлены принадлежностью рудного объекта к конкретному структурно-вещественному комплексу: жильным дунитам, полосчатому дунит-гарцбургитовому комплексу или лерцолитам (гарцбургитам). При этом, как правило, для оруденения, приуроченного к жильным дунитам характерен третий тип взаимоотношений между рудами, жильными дунитами и гарцбургитами. Характерной особенностью этих объектов является взаимно перпендикулярное расположение ориентированных текстур, что, на наш взгляд, довольно сложно объяснить как с позиций классической магматической теории породы- и рудообразования,

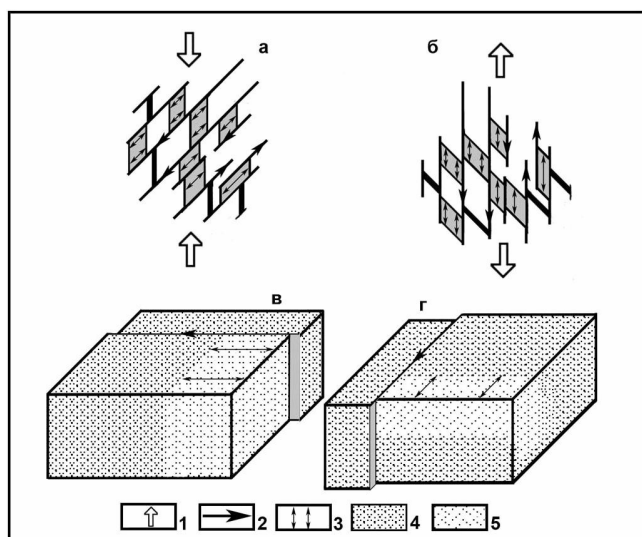


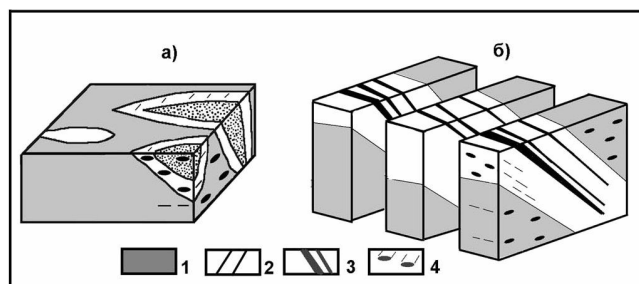
Рис. 1. Схемы развития жил выполнения в уругохрупких системах (а, б) и зон разрядки давления в твердопластичных системах (в, г).

1 – вектор давления, 2 – сколовые (сдвиговые) трещины, 3 – жилы выполнения, 4 – ненарушенный субстрат, 5 – зона разрядки давления.

и с точки зрения переотложения вещества в процессе метаморфо-метасоматического взаимодействия между породами.

Как известно из петрофизики, линейно-плоскостные ориентировки отдельных минералов и их агрегатов при воздействии стрессовых нагрузок пространственно будут располагаться перпендикулярно к направлению давления. При этом согласно-полосчатые и линейно-плоскостные текстуры формируются во всем объеме, который подвержен воздействию давления. Этот процесс реализуется на стадии оформления конкретных массивов в качестве отдельных структурно-вещественных комплексов. По справедливому замечанию Г.Н. Савельевой, способность к пластическим деформациям и течению, которое реализуется путем внутризернового (трансляционного) сдвига и межзернового скольжения (либо их комбинациями) сопровождается образованием зон с высокими диф-

ференциальными скоростями движений (сколов), синхронных пластическим деформациям [5]. На микроскопическом уровне они характеризуются разрывом межзатомных связей с плоскостным либо объемным разрушением кристаллического вещества в местах нахождения микродефектов [4]. То есть, в твердопластичном веществе возникают зоны, которые, в первом приближении, могут рассматриваться как сдвиговые деформации, характерные для упругохрупких систем. Проводя аналогию между ними, необходимо отметить, что сумма фактов, полученных в результате испытаний образцов кристаллических пород в лабораторных установках, свидетельствует о том,



**Рис. 2. Жильные тела дунитов Шоржинского массивов (а) [по 2] и фрагмент блок-диаграммы месторождения им. Менжинского (б) [по 1].**

1 – гарцбургиты нерасчлененные, 2 – жильные дуниты, 3 – рудные тела, 4 – линейная ориентировка текстур (затененные эллипсы – продольное сечение ориентированных элементов).

что трещинные деформации в упругохрупких системах представляют собой змейковые комбинации микроплощадок сдвига и отрыва, а происходящие по сдвиговым площадкам подвижки приводят к раскрытию микрополостей вдоль трещин отрыва [6, 7]. В случае твердопластичного состояния системы, «микрополостям» должны соответствовать зоны локальной разгрузки давления. Данная ситуация реализуется в ограниченном объеме, за пределами которого породы находятся в ненарушенном состоянии. В результате действия этого процесса на макроуровне, сдвиговые (сколовые) нарушения образуют определенные пространственные комбинации с трещинами отрыва (зонами разгрузки давления) (рис. 1). При этом снятие давления в этих зонах, в мантийных условиях «автоматически» должно приводить к плавлению субстрата, согласно существующим представлениям о Р-Т параметрах в мантии. Образование трещин отрыва (или локальных зон разгрузки давления) возможно как в режиме общего сжатия системы, так и при ее растяжении. При этом направления подвижек или сдвиговые трещины, превращаются в отрывные, и наоборот. Ввиду этого зоны разгрузки давления могут возникать как при декомпрессионном «расширении» астенолита, так и в условиях тангенциального сжатия системы. С этих позиций формирование различных взаимоотношений между линейно-плоскостными ориентировками минералов гарцбургитов с одной стороны и жильных дунитов с хромитовым оруденением – с другой, хорошо объясняется характером реализующихся динамических факторов. Как видно из рис. 2, линейность и плоскостная ориентировка минеральных агрегатов в перидотитах и жильных дунитах месторождения им. Менжинского и хромитового объекта Шоржинского массива располагаются перпендикулярно друг другу. Восстанавливая направления динамического воздействия на субстрат (режим сжатия с направленностью вектора усилий перпендикулярно плоскостной ориентировке минеральных агрегатов в перидотитах и образованием сколов, субпараллельных направлению линейности), получим то, что дунитовые тела с хромитовым оруденением идеально занимают положение, которое характерно для жил выполнения при формировании трещин отрыва (зон тектонической разгрузки).

Как уже отмечалось выше, в зонах разгрузки давления при заданных условиях должен реализовываться процесс частичного плавления субстрата, определяющей чертой которого является инконгруэнтное плавление ортопироксена. Графический анализ системы  $MgO-SiO_2$  с точкой состава 80% оливина и 20% ортопироксена, соответствующей природному гарцбургиту показывает, что в процессе моновариантной реакции, 20% ромбического пироксена превращаются в 4% кристаллов оливина и 16% расплава. При этом важно отметить, что в условиях высокого давления и при отсутствии воды, поле расплава форстерита уменьшается относительно поля расплава энстатита, следствием чего является конгруэнтное плавление энстатита при давлении около 5 Кбар и выше. Оценки давлений, определенные для раннего этапа формирования высокотемпературных пластических деформаций в породах массива Средний Крака колеблются в пределах 6-7 Кбар, а величины стрессовых давлений составляли 300-400 бар, достигая в локальных зонах 550 бар [5], что указывает на близость этих значений к «пороговому», при котором ортопи-

роксен начинает плавиться инконгруэнтно, подтверждая таким образом, реальность предлагаемой модели, так как величины стрессовых нагрузок вполне достаточны для образования сдвиговых деформаций, а снижение давления в зонах тектонической нагрузки может достигать 1-1,5 Кбар.

Образование хромитовой минерализации, приуроченной к телам жильных дунитов, также находит удовлетворительное объяснение с позиций предлагаемого механизма формирования зон тектонической разгрузки. Как известно, из минерального парагенезиса оливин–ортопироксен, являющегося основным для описываемых пород, хром концентрируется в ортопироксене, составляя в среднем чуть выше 1 вес.% [3, 5], в то время как оливин практически стерилен в отношении этого элемента. В кристаллическую решетку оливина в заметных количествах хром может внедряться лишь в виде  $Cr^{2+}$ , что характерно для предельно восстановительных условий. Однако согласно данным Х. Шрайбера, кристаллизация оливина даже в восстановительных условиях должна приводить к обогащению хромом остаточных расплавов [9]. Проведенное изучение составов хромшпинелидов из гарцбургитов, жильных дунитов и приуроченных к ним руд на месторождении им. Менжинского показало – между содержаниями алюминия и хрома в хромшпинелидах из руд и рудовмещающих дунитов, с одной стороны, и гарцбургитов – с другой, наблюдается четко выраженная обратная зависимость. В рудах и дунитах содержится высокохромистая разновидность, а в гарцбургитах – высокоглиноземистая; – распределение магния, титана, марганца и железа отличаются меньшей контрастностью, но тем не менее и для этих элементов характерны повышенные содержания в хромшпинелидах из руд и рудовмещающих дунитов по сравнению с хромшпинелидами из гарцбургитов. Из этих данных следует, что хромшпинелиды руд и рудовмещающих дунитов в значительной степени отличаются от хромшпинелидов окружающих гарцбургитов по содержанию основных минералообразующих окислов и элементов-примесей.

Может ли инконгруэнтное плавление ортопироксена в зонах тектонической разгрузки привести к вышеописанной картине распределения элементов во вновь образующихся оливинах и хромшпинелидах? Анализ имеющихся материалов показывает, что в результате плавления ромбического пироксена, новообразующийся оливин должен несколько отличаться от оливина окружающих гарцбургитов. Действительно, по сравнению с оливинами из гарцбургитов оливины хромитовых руд и жильных дунитов отличаются большим количеством никеля и, что очень заметно, кальция. Ранее [10] было установлено, что концентрация кальция в оливине связана с глубиной становления ультрабазитов, иными словами, повышение давления препятствует вхождению этого элемента в структуру минерала. В нашем случае наблюдается четко проявленное обогащение кальцием оливина второй генерации из хромитовых руд и рудовмещающих дунитов по сравнению с гарцбургитами, что служит надежным доказательством формирования первых при меньших давлениях, а именно, в зонах тектонической разгрузки, где кальций, освободившийся при плавлении ортопироксена, входит в структуру вновь образующегося оливина. Установленная закономерность, заключающаяся в том, что понижение давления способствует росту хромистости существующих шпинелевых фаз [8], также находит свое место в модели формирования жильных дунитов в зонах разгрузки давления, объясняя наличие в дунитах и рудах высокохромистых хромшпинелидов. Следовательно, установленные выше особенности химического состава оливинов и хромшпинелидов из рудных тел и рудовмещающих дунитов могут быть обусловлены инконгруэнтным плавлением ортопироксена в зонах тектонической разгрузки.

В заключение необходимо отметить, что предлагаемый механизм образования жильных дунитов предполагает их размещение внутри массивов в виде комплекса тел, наследующих системе образующихся «трещин отрыва» (зон тектонической разгрузки давления). И хотя сложная история формирования отдельных ультраосновных комплексов, включающая в себя этапы твердопластической деформации в мантийных условиях и протрузивный характер внедрения может практически полностью затушевать эту систему, в некоторых случаях ее элементы отчетливо читаются при анализе геологического строения отдельных массивов, как например, на массивах Крака.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев С.Г., Салихов Д.Н. Полезные ископаемые Республики Башкортостан (хромитовые руды). Уфа: «Экология». 2000. 207 с.

2. *Кравченко Г.Г.* Типы ориентировок такситовых текстур хромитовых месторождений геосинклинальных зон // Геология рудных месторождений. 1972. Т. XIV. № 6. С. 79-86.
3. Магматические горные породы / Богатиков О.А., Васильев Ю.Р., Дмитриев Ю.И. и др. М.: Наука, 1988. Т. 5. 508 с.
4. *Мораховский В.Н.* Сдвиги и сдвиговые деформации в земной коре // Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. М.: Наука, 1991. 214 с.
5. *Савельева Г.Н.* Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре // Тр. ГИН АН СССР, вып. 404. М.: Наука, 1987. 246 с.
6. *Ставрогин А.Н.* Исследования предельных состояний и деформаций горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1969. № 12. С. 3-17.
7. *Томашевская И.С.* Определение скоростей продольных волн в образцах горных пород при испытаниях на сжатие до разрушения при различном всестороннем давлении // Проблемы механики горных пород. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1966. С. 407-412.
8. *Dick H.J.B., Bullen T.* Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites // Contrib. Mineral. And Petrol. 1984. V. 86. N 1.
9. *Schreiber H.D.* Experimental studies of nickel and chromium partitioning into olivine from synthetic basaltic melts // Proc. X Lunar and Planet. Sci. Conf. Houston, 1979. P. 509-516.
10. *Simkin T., Smith J.V.* Minor-element distribution of olivine // J. Geol. 1970. V. 78. № 3.

### **ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ПЛАТИНОСОДЕРЖАЩИХ ДУНИТОВЫХ РУД ГАЛЬМОЭНАНСКОГО ЗОНАЛЬНОГО БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВОГО МАССИВА (КАМЧАТКА)**

**Козлов А.П.**

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия  
e-mail: kozap@mail.ru*

### **TECHNOLOGIC ASPECTS OF MINING IN PGE DUNITE ORES OF THE GALMOENAN MAFIC-ULTRAMAFIC MASSIF, KAMCHATKA**

**Kozlov A.P.**

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russia  
e-mail: kozap@mail.ru*

Technologic aspects of PGE mining in the source deposits of the Ural-Alaskan type Galmoenan mafic-ultramafic massif are considered. The new model of enrichment and secondary PGE extraction is proposed.

Элементы платиновой группы (ЭПГ) – собственно платина, а также палладий, рутений, родий, иридий и осмий представляют собой ценное минеральное сырьё, которое за счет своих особых физико-химических свойств находит широкое применение во многих отраслях промышленности. Рыночная цена на платиноиды неуклонно растет, так как они находят широкое применение в новейших технологиях. Россия издавна является крупнейшим поставщиком платиновых металлов на мировой рынок, но если за рубежом, в первую очередь в ЮАР, основной объем добычи составляет платина, то в российском производстве доминирует палладий. Сложившееся положение обусловлено тем, что 99,5% активных запасов ЭПГ сосредоточено в сульфидных (Норильский район) и малосульфидных (Кольский п-ов) рудах расслоенных комплексов, где платина к палладию имеет резко подчинённое значение [1].

Для увеличения активных запасов и объемов производства платины в России наиболее значимым представляется платинометальное оруденение зонально-концентрических дунит-пироксенит-габбровых массивов Урала, Алдана и Камчатки, являющихся коренным источником уникальных, ныне практически отработанных, россыпей платины. В современной классифика-