

## К ВОПРОСУ ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГИПЕРБАЗИТОВ УРАЛА ПО ПАРАМЕТРАМ ИХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

**Бахтерев В.В.** – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

**Аннотация.** Изучены образцы горных пород из различных структурно-вещественных комплексов некоторых гипербазитовых массивов Урала. Получены температурные зависимости электрического сопротивления в интервале температур 20–800 °С. Определены электрические параметры  $\lg R_0$ ,  $E_0$  исследованных образцов. Выявлена обратная линейная зависимость между параметрами. Она выражается формулой  $\lg R_0 = a - bE_0$ . При этом коэффициент  $a$  практически одинаков для всех исследованных массивов и участков в них (7,0–7,4). Коэффициент  $b$  меняется непрерывно от 5,8 до 13,2; отличается не только для каждого гипербазитового массива, но даже для отдельного участка в пределах одного массива.

*Гипербазиты, электрическое сопротивление, энергия активации, высокая температура.*

## ON THE TYPIFICATION GIPERBASITES URALS PARAMETERS FOR THEIR HIGH CONDUCTIVITY

**Bakhterev V.V.** – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

**Abstract.** Were studied rock samples from different structural-material complexes of some ultramafic massifs of the Urals. The experiments allowed to establish dependence of electrical resistance on temperature in the range of 20–800 °C. Are defined electrical parameters  $\lg R_0$ ,  $E_0$  studied samples. There was an inverse linear dependence of between the parameters. It is expressed by the formula  $\lg R_0 = a - bE_0$ . The coefficient  $a$  is practically the same for all studied massifs and plots them (7.0–7.4); the coefficient  $b$  changes continuously from 5.8 to 13.2; its value differs not only for each ultramafic massif, but even for an individual plot within the same massif.

*Hyperbasite, electrical resistance, activation energy, high temperature.*

### Введение

Земные недра являются очень сложными и разнообразными как по строению, так и по вещественному составу образованиями. Это разнообразие заложено в самом их генезисе. Геологические явления протекают непрерывно, в результате образуются разные горные породы. Но и ряд различных геологических явлений может привести к образованию одной и той же по своим признакам горной породы. В процессе эволюции горные породы претерпевают разнообразные многократные изменения. При этом горные породы из отдельных однородных участков одного и того же геологического тела не всегда обособлены, а границу между ними можно провести в значительной мере условно.

Ультраосновные породы имеют специфический минеральный состав. Они состоят практически лишь из темноцветных минералов: оливина, ромбического и моноклинного пироксенов в различных соотно-

шениях. Известен ряд их классификаций (Малахов, 1983; Золоев, Булыкин, 1983; Заварицкий, 1961).

Классификация гипербазитов на минеральной основе базируется на выделении основных типов пород по соотношению в них этих минералов. Так, И.А. Малахов (Малахов, 1983) для ультраосновных пород Урала выделяет пять основных групп в зависимости от содержания в них оливина, %: дунит – содержание оливина 90–100, оливиновый гарцбургит – 70–90, гарцбургит – 55–70, оливиновый энстатит – 10–35, энстатит – 0–10.

Химическая классификация предусматривает выделение класса ультраосновных пород при  $\text{SiO}_2 < 45\%$ , но содержание  $\text{SiO}_2$  зависит от степени метаморфизма пород, поэтому большинство исследователей используют классификацию на количественно-минералогической основе. Классификация пород по содержанию только одного кремнезема является с методологиче-

ской точки зрения недостаточной. Современные классификации учитывают широкий комплекс элементов, входящих в состав горной породы. Наиболее детально такая классификация проведена А.Н. Заварицким (Заварицкий, 1961).

Граничные значения содержаний как минералов, так и  $\text{SiO}_2$  традиционны и подтверждены статистически, но при этом условны, так как породы смежных отрядов, как и групп более низких уровней, связаны между собой постепенными переходами, и «естественные» границы между ними, как правило, отсутствуют.

Плодотворной оказалась классификация гипербазитов по формационному признаку, поскольку в этом случае выделяются закономерные ассоциации генетически связанных горных пород, повторяющиеся во времени и пространстве. Вполне естественно, что при этом, помимо геологических особенностей, необходимо учитывать и тектонический фактор. Иными словами, формации ультраосновных пород следует классифицировать как по набору пород, так и по их положению в истории развития геологических структур земной коры.

Петрографический словарь под редакцией В.П. Петрова и О.А. Богатикова (Петрографический..., 1981) определяет формацию, как «...естественное сообщество магматических горных пород, обладающих определенной общностью состава, проявляющееся в определенной геотектонической обстановке. Термин является общим классификационным понятием, в котором обобщены главные петрографические, петрохимические и другие особенности» (там же, 1981, с. 459).

Применительно к гипербазитам нет единого мнения относительно того, что считать формацией. Противоречивость взглядов на формационное расчленение гипербазитов Урала традиционно исходит из различного понимания исследователями роли и масштабов тех или иных геологических процессов. Однако, несмотря на это, среди гипербазитов Урала выделяют палеозойскую офиолитовую (альпинотипную), палеозойскую дунит-

клинопироксенитовую формации и протерозойские габброидные гипербазиты (расслоенные интрузии) (Булыкин, Андреев, 1990; Варлаков, 1986; Золоев, Булыкин, 1983; Штейнберг, 1988). Главные формационные типы гипербазитов Урала различны по особенностям вещественного состава и металлогении. Гипербазиты отличаются большим разнообразием процессов серпентинизации, генезисом исходных пород и последующей тектономагматической эволюцией регионов их локализации.

Процессы серпентинизации многообразны по генетической природе. Ход и конечные продукты серпентинизации в значительной мере обусловлены физико-химической обстановкой и соотношениями явлений прогрессивного и регрессивного метаморфизма. При этом известны случаи выделения нескольких ассоциаций гипербазитов в пределах одного массива (Булыкин, 1977; Царицын, 1977; Попова и др., 1994 и др.). Особенности состава и структуры минералов этих пород отражают физико-химические условия обстановки их генезиса и неодинаковым и сложным образом влияют на величину и характер температурной зависимости электрического сопротивления отдельных образцов горных пород.

#### *Результаты предыдущих исследований*

Ранее (Бахтерев, 2004; 2008) были изучены образцы гипербазитов главных формационных типов. При исследовании высокотемпературной электропроводности горных пород выявлена обратная линейная зависимость между энергией активации ( $E_0$ ) и так называемым коэффициентом электрического сопротивления ( $\lg R_0$ ), с одной стороны, и принадлежностью образца к тому или другому формационному типу гипербазитов, с другой. Она выражается формулой  $\lg R_0 = a - bE_0$ , где  $a$  и  $b$  – коэффициенты. Причем коэффициент  $a$  практически одинаков для всех исследованных образцов гипербазитов трех главных формационных типов (7,0–7,4), а коэффициент  $b$  отличается для разных типов исследованных гипербазитов (5,8 – Сарановский мас-

сив – расслоенные интрузии; 7,2 – гора Соловьева – Платиноносный пояс Урала; 12,1 – Баженовский массив – альпинотипные гипербазиты). При этом было установлено, что образцы гипербазитов из определенного формационного типа по своим электрическим параметрам укладываются на одну прямую, как бы формируя ее, с параметрами  $\lg R_0$  и  $E_0$ . Однако значительная часть исследованных образцов (около 10–15 %), несмотря на тщательность привязки их, как считалось, к главным формациям, выпадала из этой зависимости.

Настоящая работа продолжает названные выше исследования. Ее основная задача: набор фактического материала за счет исследования образцов из большего числа генетически различных структурно-вещественных комплексов гипербазитов, на основе чего попытаться установить как меняются параметры образцов из разных массивов, хотя и относимых к «главным» формационным типам.

**Методика исследований и образцы**

Исследованные нами образцы были отобраны с ограниченной площади и не могут характеризовать весь гипербазитовый массив. Образцы с других участков в силу геологических особенностей массива могут отличаться от образцов, исследованных нами, вполне вероятно, что они будут иметь иные электрические параметры.

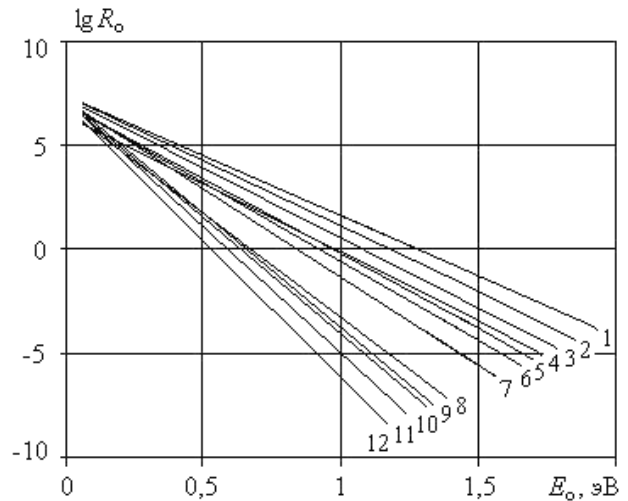
Методика исследований описана нами ранее (Бахтерев, 2004). Образцы серпентинитов вырезали в форме кубика с ребром 0,02 м. Электрическое сопротивление образцов измеряли двухэлектродной установкой через каждые 10 градусов в интервале температур 20–800 °С. Скорость нагревания 0,066 град/с. Температуру в системе определяли в 0,01 м от образца платиноплатинородиевой термопарой. Измерения осуществляли на постоянном токе.

Измерительный прибор – тераомметр Е6-13 с динамическим диапазоном от 10 до  $10^{14}$  Ом и относительной ошибкой измерений от ±2,5 до 4 % в конце диапазона. Для определения электрических параметров температурные кривые электрического сопротивления были построены в координа-

тах  $\lg R, 1/T$ . Энергия активации  $E_0$  определена по величине тангенса угла наклона касательной к кривой  $\lg R=f(1/T)$  в некоторой точке прямолинейного участка в температурной области, где кривая  $\lg R=f(1/T)$  не искажена аномальными эффектами. Коэффициент электрического сопротивления  $\lg R_0$  определен как величина отрезка, отсекаемого касательной к кривой  $\lg R=f(1/T)$  на оси ординат.

**Результаты и их обсуждение**

Данные, приведенные на рис. 1–3 и в табл. 1 и 2, подтверждают и дополняют выполненные ранее исследования.



**Рис. 1.** Зависимости  $\lg R_0 = f(E_0)$  гипербазитов из некоторых структурно-вещественных комплексов массивов Урала различной формационной принадлежности.

Массивы: 1 – Сарановский; 2 – Тургоякский (серпентиниты апогарцбургитовые лизардитовые с преобладанием лизардита; апогарцбургитовые антигоритовые; аподунитовые антигоритовые); 3 – Уктусский; 4 – Верблюжьегорский; 5 – Соловьева гора; 6 – Кытымский; 7 – Войкаро-Сыньинский; 8 – Алапаевский; 9 – Ключевской; 10 – Каркодинский; 11 – Баженовский; 12 – Тургоякский (серпентинит апогарцбургитовый лизардитовый с преобладанием антигорита)

Из анализа полученных материалов следует, что коэффициент  $a$  в уравнении  $\lg R_0 = a - b E_0$  практически одинаков для всех исследованных объектов; коэффициент  $b$  меняется от 5,8 до 13,2 в зависимости от структурно-вещественного комплекса.

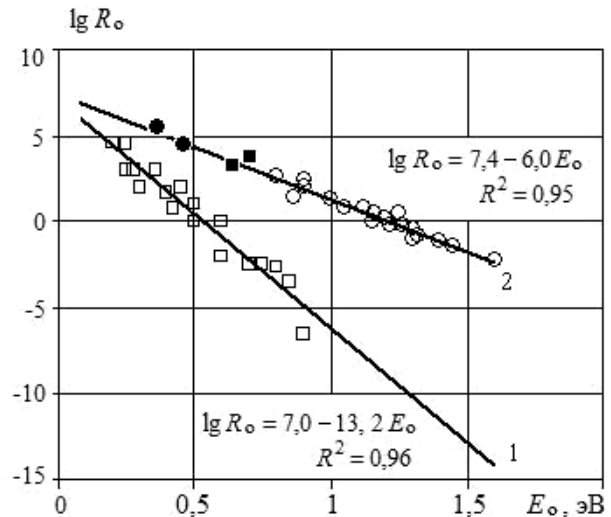
На рис. 1 в координатах  $\lg R_0$ ,  $E_0$  даны прямые корреляции исследованных образцов, связанных постепенными переходами от гипербазитов перидотитовой формации (прямая 1) через гипербазиты Платиноносного пояса (прямые 3, 5, 6) к офиолитовым гипербазитам (прямые 10–12). Из этой схемы явно выпадают образцы из Тургоякского (прямые 2, 12) и Верблюжьегогорского (прямая 4) массивов. Экспериментальные значения ввиду их большого количества (всего отобрано и исследовано около 1300 образцов), чтобы не загромождать рисунок, здесь не показаны.

В качестве примера на рис. 2 и 3 показана связь между  $\lg R_0$  и  $E_0$  для двух групп образцов, отобранных из двух участков Тургоякского массива и из одного участка Верблюжьегогорского массива.

На рисунках показана часть результатов, четко прослеживающих тенденцию изменения параметров в зависимости от состава пород. Одна группа образцов из Тургоякского массива (Серпентиниты апогарцбургитовые лизардитовые с преобладанием антигорита) имеет параметры близкие с образцами дунит-гарцбургитовых массивов (рис. 1, прямая 12; рис. 2, прямая 1).

**Таблица 1.** Коэффициенты уравнения связи  $\lg R_0 = a - bE_0$  исследованных гипербазитов

№№ пп	Гипербазитовый массив	Коэффициенты уравнения	
		<i>a</i>	<i>b</i>
1	Сарановский	7,0	5,8
2	Тургоякский	7,4	6,0
3	Уктусский	7,1	6,2
4	Верблюжьегогорский	6,4	6,6
5	Соловьева гора	7,0	7,2
6	Кытлымский	7,0	7,6
7	Войкаро-Сыньинский	7,1	8,5
8	Алапаевский	6,7	10,0
9	Ключевской	7,2	11,0
10	Каркодинский	7,2	11,7
11	Баженовский	7,1	12,1
12	Тургоякский	7,0	13,2

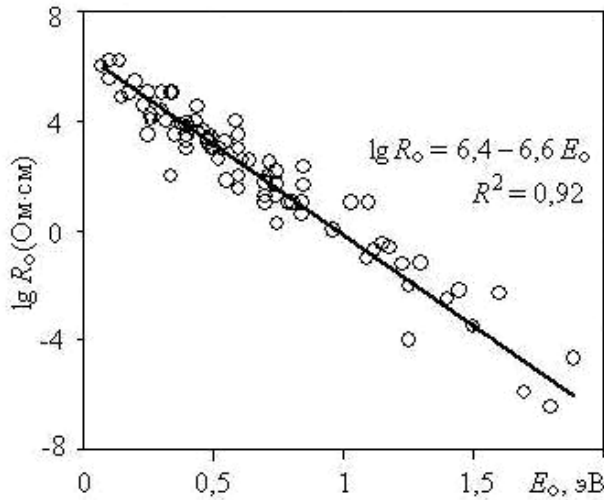


**Рис. 2.** Связь между  $E_0$  и  $\lg R_0$  исследованных образцов серпентинитов из Тургоякского гипербазитового массива. Экспериментальные значения  $\lg R_0 = f(E_0)$ : светлые кружки – серпентиниты апогарцбургитовые лизардитовые с преобладанием лизардита; темные квадраты – апогарцбургитовые антигоритовые; темные кружки – аподунитовые антигоритовые; светлые квадраты – серпентинит апогарцбургитовый лизардитовый с преобладанием антигорита. Прямые линии – прямые корреляции  $\lg R_0 = f(E_0)$

Вторая, вероятно, – как с образцами дунит-клинопироксенитовых массивов Платиноносного пояса, так и расслоенных интрузий (рис. 1, прямая 2; рис. 2, прямая 2).

К какой формации отнести эти образцы сказать затруднительно. По описанию шлифов они четко разделяются на апогарцбургитовые лизардитовые с преобладанием лизардита, апогарцбургитовые антигоритовые и аподунитовые антигоритовые. Отличаются они и по электрическим параметрам, укладываются по этим показателям на одну прямую, как бы формируя ее разные участки (рис. 2, прямая 2; табл. 2).

Полученные результаты не противоречат геологическим данным. На Таловском гипербазитовом массиве, южным продолжением которого является Тургоякский массив, наряду с дунит-гарцбургитами выделены дунит-клинопироксенитовые комплексы пород, сходные по составу и строению с дунит-клинопироксенитовыми массивами Платиноносного пояса (Булыкин, 1977; Степанов и др., 2012). На Хабаровин-



**Рис. 3.** Связь между  $E_0$  и  $lgR_0$  исследованных образцов серпентинитов из Верблюжьегогорского гипербазитового массива. Кружки – экспериментальные значения  $lgR_0 = f(E_0)$ . Прямая линия – прямая корреляции  $lgR_0 = f(E_0)$

ском массиве, входящем, как и Тургоякский, в Уфалейско-Кемпирсайский пояс ультраосновных пород, выделены три ассоциации гипербазитов: дунит-гарцбургитовая (альпинотипная), дунит-клинопироксенитовая (аналогичная Платиноносному поясу Урала), дунит-перидотит-габбровая, сопоставимая со стратиформными комплексами типа Сарановского (Царицын, 1977).

Геологическая характеристика Верблюжьегогорского гипербазитового массива описана в ряде работ (Кашин, 1937; Реестр..., 2000; Малахов и др., 2003). Массив подвергся интенсивному метаморфизму в коровых условиях. Это выразилось в меланжировании, трансформации первичных структур и серпентинизации. Кроме того, массив претерпел прогрессивный метаморфизм антигоритовой фации в связи с термальным воздействием гранитоидов Джабык-Карагайского массива. Эпимагматические (вторичные) тектонические воздействия оказали сильное динамическое влияние на серпентиниты, в результате чего главная масса их была в той или иной степени рассланцована, смята, местами раздроблена. Порода, не затронутых вторичными изменениями, в массиве не наблюдалось. Все

они в разной степени изменены процессами серпентинизации, карбонатизации, оталькования, окремнения.

По текстурным признакам С.А. Кашин (Кашин, 1937) выделил серпентиниты массивные, смятые, сланцеватые, полосчатые, грубобрекчированные. Все литологические различия серпентинитов локализованы в определенных участках массива. Серпентиниты местами претерпели существенное изменение и в минералогическом составе, выразившееся в окварцевании, карбонатизации, отальковании, в сопровождении выделений тремолита, актинолита, идингсита и других минералов. Первичные минералы в верхней зоне массива отсутствуют. Отдельные зерна оливина встречаются лишь на некоторой глубине, насколько можно судить по данным буровых скважин. Присутствие в породе баститов и структурные особенности серпентинитов позволяют отнести большую часть материнских пород, слагающих Верблюжьегогорский массив, к перидотитам типа гарцбургитов.

По данным работы (Реестр..., 2000) природа части серпентинитов гарцбургитовая, части «вероятно, гарцбургитовая», части неясная. Малахов и соавторы (Малахов и др., 2003) считают, что массив сложен антигоритовыми серпентинитами неясной природы (вероятно, гарцбургитовыми). Правда, в другой работе утвержда-

**Таблица 2.** Параметры электропроводности серпентинитов из Тургояковского массива

Серпентинит	Параметр	
	$lgR_0$	$E_0$
Аподунитовый антигоритовый	0,8 – 5,0	0,35 – 1,0
Апогарцбургитовый антигоритовый	(-0,2) – 2,75	0,7 – 1,15
Апогарцбургитовый лизардитовый с преобладанием лизардита	(-2,0) – 1,75	0,88 – 1,5

ется, что «Верблюжьегогорский массив представляет собой верхние горизонты ультрамафитового комплекса, сложенные исключительно гарцбургитами. Интенсивные тектонические подвижки привели ... к выводу на поверхность некоторых глубинных блоков массива, представленных дунит-гарцбургитовым комплексом» (Алексеев и др., 2003, с. 155).

По электрическим параметрам исследованные образцы из Верблюжьегогорского массива занимают промежуточное положение между образцами из Уктусского массива и горы Соловьевой, относимых к массивам Платиноносного пояса. При этом для исследованных образцов из Верблюжьегогорского массива выявлен самый большой диапазон вариаций электрических параметров в сравнении с другими массивами. Энергия активации ( $E_0$ ) здесь изменяется от 0,1 до 2,5 эВ, коэффициент электрического сопротивления ( $\lg R_0$ ) – от (-6) до 6.

Для сравнения приводим данные по другим массивам. Так для исследованных образцов из Алапаевского массива  $E_0$  меняется от 0,25 до 1,2 эВ,  $\lg R_0$  от (-2) до (-5); Ключевского массива  $E_0$  меняется от 0,4 до 1,6 эВ,  $\lg R_0$  – от (-3) до 3. Данные по Тургойскому массиву приведены в табл. 2.

### **Заключение**

Сложный состав и генезис гипербазитов трудно поддается идентификации. Исследованные электрические свойства не всегда позволяют установить естественную классификацию гипербазитов по формационному признаку. Электрические свойства, как и составы, и структуры горных пород, изменяются непрерывно, так что напрашивается вывод о невозможности их естественной классификации с резкими разделительными границами. Тем не менее, электрические свойства горных пород – весьма чувствительные индикаторы их вещественного состава и генетических процессов. Они являются важными источниками информации.

### **Литература**

- Алексеев А.В., Малахов И.А., Бурмако П.Л. Метаморфизм хромитовых руд Верблюжьегогорского массива (Южный Урал) // Эволюция внутриконтинентальных подвижных поясов (IX чтения А.Н. Заварицкого) Екатеринбург, 2003. С. 153–156.
- Бахтерев В.В. Оценка формационной принадлежности гипербазитов Урала по параметрам их высокотемпературной электропроводности // ДАН, 2004. Т. 398, № 3. С. 371–373.
- Бахтерев В.В. Высокотемпературные исследования гипербазитов Урала: Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 152 с.
- Булыкин Л.Д. К минералогии и петрологии дунит-клинопироксенитовых комплексов в альпинотипных гипербазитах Урала (на примере Нуралинского массива) // Минералогия и геохимия гипербазитов Урала: Минералогический сборник. № 13. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. С. 58–61.
- Булыкин Л.Д., Андреев М.И. Главные генетические типы хромитовых месторождений Урала и закономерности их размещения // Геология и полезные ископаемые Урала. Свердловск: УрО РАН, 1990. С. 65–74.
- Варлаков А.С. Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 224 с.
- Заварицкий А.Н. Изверженные горные породы / Отв. редактор акад. А.Г. Бетехтин. М.: АН СССР, 1961. 478 с.
- Золотов К.К., Булыкин Л.Д. Формационные типы гипербазитов Урала и их металлогения // Вопросы геологической корреляции и металлогения Урала. М.: МГ РСФСР, 1983. С. 72–82.
- Кашин С.А. Метаморфизм хромшпинелидов в хромитовых месторождениях Верблюжьих гор (на Южном Урале) // Хромиты СССР. Т. 1 / Под ред. А.Е. Ферсмана и А.Г. Бетехтина. М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1937. С. 251–338.
- Малахов А.И. Петрохимия главных формационных типов ультрабазитов. М.: Наука, 1983. 223 с.
- Малахов И.А., Алексеев А.В., Бурмако П.Л. Многостадийность формирования хромитов в гарцбургитах уральских массивов и влияние на их состав процессов метаморфизма//

Известия УГГА. Серия: Геология и геофизика. 2003. Вып. 18. С. 78–84.

Петрографический словарь / Под ред. В.П. Петрова, О.А. Богатикова. М.: Недра, 1981. 496 с.

*Попова В.И., Попов В.А., Клочков И.К.* Хромиты Таловского массива // Уральский минералогический сборник. 1994. № 3. С. 124–130.

Реестр хромитопоявлений в альпийских ультрабазах Урала. Пермь: КамНИИКИГС, 2000. 474 с.

*Степанов С.Ю., Пилюгин А.Г., Лазаренков В.Г.* О минералах элементов платиновой группы и золота в хромитовых рудах Тургорского рудопроявления Таловского

массива (Южный Урал) // Уральская минералогическая школа-2012. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2012. С. 162–166.

*Царицин Е.П.* Петрохимические особенности гипербазитов и состав акцессорных хромшпинелидов Хабарнинского ультраосновного массива // Минералогия и геохимия гипербазитов Урала: Минералогический сборник № 13. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. С. 17–32.

*Штейнберг Д.С.* Формационное расчленение, генезис и металлогения ультрабазитов // Формационное расчленение, генезис и металлогения ультрабазитов. Свердловск: УрО РАН, 1988. С. 3–11.