

сульфид, отдающий при окислении электроны, занимает по отношению к бактериальным клеткам анодное положение.

2. Бактериальное окисление медных сульфидов (халькопирита, халькозина, борнита) ощутимо интенсифицируется, когда минералы образуют смеси друг с другом или с пиритом. В смесях (в полиминеральных рудах) минерал, обладающий более высоким электродным потенциалом (пирит или халькопирит по сравнению с халькозином и борнитом), наряду с бактериальными клетками выполняет роль дополнительного катада, усиливающего процесс окисления низкопотенциального минерала. При этом извлечение меди из руд резко увеличивается.

3. В практике бактериального извлечения меди из медных сульфидных руд следует учитывать минеральный тип руды, наличие в ее составе высокопотенциальных минералов (особенно немедных), характер сочетаний минералов друг с другом. В случае нехватки в составе руды «катодных» сульфидов (например, пирита) можно рекомендовать их специальную добавку, увеличивающую выход меди в раствор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яхонтова Л. К., Сергеев В. М., Каравайко Г. И., Суханцева В. С.— Реальная конституция сульфидов и процесс их бактериального окисления.— В кн.: Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов. Пущино, 1976.
2. Яхонтова Л. К., Каравайко Г. И. Геохимическая деятельность микроорганизмов на рудных месторождениях.— Вестн. МГУ, 1977, вып. 1.
3. Яхонтова Л. К., Нестерович Л. Г.— О механизме химического и бактериального окисления халькозина.— Геохимия, в. 8, 1978.
4. Яхонтова Л. К., Нестерович Л. Г., Суханцева В. С. Новые данные о механизме бактериального окисления минералов.— ДАН СССР, 1977, т. 237, № 2.
5. Яхонтова Л. К., Нестерович Л. Г., Грудев А. П., Суханцева В. С. О механизме окисления сульфидов меди в связи с проблемой бактериального выщелачивания руд.— Изв. вузов. Сер. геол. и разведка, 1979, № 2.
6. Яхонтова Л. К., Грудев А. П. Проблема электрохимического фактора в зоне гипергенеза рудных месторождений.— Изв. АН СССР, 1974, № 6.
7. Malouf E., Prater I. Role of bacteria in the alteration of sulphide minerals.— J. Metals, 1961, v. 13, p. 353.
8. Bryner L. G., Anderson R. Mikroorganisms in leaching sulphide minerals.— Industr. and engen. Chem., 1957, v. 49, p. 1721.

И. В. ГИНЗБУРГ

О КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИХ ЧЕРТАХ ПИРОКСЕНОВ НЕКОТОРЫХ ОСНОВНЫХ И ОСНОВНЫХ-УЛЬТРАОСНОВНЫХ ИНТРУЗИВОВ С НИКЕЛЕВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ

К настоящему времени весьма детально изучены в разной степени дифференцированные («расслоенные») интрузивы, сложенные горными породами, основного или основного-ультраосновного рядов (по химической классификации), сопровождаемые сульфидно-медно-никелевой минерализацией.

Преобладающими и петрогенетически наиболее важными минералами этих горных пород и образованных ими интрузивов являются пироксены, переменный состав которых дает весьма существенные и разнообразные сведения о вероятных ($P-T$)-условиях и связанных с ними возможных путях формирования горных пород и интрузивов в целом.

Ниже обсуждаются пределы содержания катионов в формулах пироксенов из нескольких никеленосных интрузивов трех районов СССР:

габбро-долеритовых (Норильск-1 [1], Талнах [2]), перидотит-пироксенит-габбро-норитовой (Мончегорск [3]), перидотит-пироксенит-габбро-норитовых (Липов Куст, Мигулинская, Третинская, Калмыковская и др. [4—7])¹.

Кристаллохимические формулы пироксенов рассчитаны из данных весовых химических анализов, сделанных в основном по классической прописи — из больших исходных навесок и потому по сравнению с микронзондовыми они являются усредненно-статистическими. Для наших целей важны интервалы атомных чисел катионов в формулах пироксенов (которые обычно пишутся как индексы — коэффициенты при катионах). Для удобства сравнения пределы содержания катионов даны столбиками (таблица). Оказалось, что пределы содержания главных катионов у пироксенов каждого из рассматриваемых трех районов СССР варьируют несильно (см. таблицу):

Δ_{\max} у авгитов	Δ_{\max} у бронзитов-гиперстенов
Ca 0,16 — 0,18;	Ca 0,05 — 0,14
Mg 0,36 — 0,44;	Mg 0,32 — 0,40
Fe ²⁺ 0,14 — 0,43;	Fe ²⁺ 0,21 — 0,60
Si 0,06 — 0,11;	Si 0,06 — 0,11

Содержание катионов-примесей изменяется еще меньше (см. таблицу):

Δ_{\max} у авгитов	Δ_{\max} у бронзитов-гиперстенов
Na 0,05 — 0,10;	Na 0,01 — 0,04
K 0,00 — 0,02;	K 0,01
Mn 0,00 — 0,01;	Mn 0,01 — 0,02
Al 0,10 — 0,14;	Al 0,07 — 0,08
Fe ³⁺ 0,08 — 0,17;	Fe ³⁺ 0,01 — 0,08
Ti 0,01 — 0,03;	Ti 0,03
Cr ³⁺ 0,02 — 0,03;	Cr ³⁺ 0,04

1. Пироксены извлечены из следующих горных пород (см. таблицу).

Авгиты.

Норильск-1: из габбро, габбро-долерита (без оливина, с примесью оливина), из разных габбро-долеритов (пойкилоофитового, оливинового, пикритового, такситового и контактового).

Талнах: из габбро-долеритов (призматически-офитового, оливинсодержащего офитового, пойкилофитового, такситового).

Мончегорск: из полевошпатового перидотита.

Юг Восточно-Европейской платформы (интрузии Липов Куст, Мигулинская, Третинская, Калмыковская) из оливинового и из амфиболизированного габбро, из габбро-норита, оливинового плагиопироксенита, из перидотитов.

Бронзиты, гиперстены.

Мончегорск: из разных норитов, полевошпатового перидотита, оливинового и полевошпатового пироксенитов, норит-пегматита, рудного пегматита.

Юг Восточно-Европейской платформы: (интрузии Липов Куст, Мигулинская, Третинская и др.): из норита, безоливинового и оливинового габбро-норита (в том числе амфиболизированного), габбро-диабазы, плагиопироксенита, перидотита.

¹ Указанные в ссылках работы содержат общегеологические данные (все интрузивы докембрийские, глубокого заложения, приуроченные к зонам разломов) и петрологические («расслоенность» считается следствием сложных процессов дифференциации в камере застывания).

Пределы колебания атомных чисел катионов в формулах пироксенов никеленосных интрузивов

Пироксены	Интрузивы	M2				M2+M1		M1					T				Число анализов	
		Ca	Mn	Na	K	Mg	Fe ²⁺	Mn	Fe ²⁺	Ti	Al	Cr	Si	Al	Ti	Fe ³⁺		
Авгит	Норильск-1, [1]	0,63	—	0,02	0,00	0,78	0,14	0,004	0,00	0,004	0,00	0,001	1,87	0,07	0,00	0,00	11	
		0,79	—	0,03		0,94	0,28	0,01	0,05	0,03	0,09	0,02	1,93	0,13	0,02			
	Талнахская, [2]	0,74	—	0,00	0,00	0,68	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,86	0,05	0,00	0,00	14 *2	
		0,84	—	0,05		0,92	0,31	0,01	0,08	0,03	0,14	0,02	1,92	0,14	0,03			
		0,70	—	0,03		1,03	0,12	0,01	0,05	0,01	0,02	0,03	1,88	0,12	0,00			0,00
Мончегорск, [3] Липов Куст, Мигулин- ская, Третинская, Кал- мыковская, [5]	0,61	—	0,00	0,00	0,67	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	1,88	0,01	0,00	0,00	9+3 *3		
	0,79	—	0,10	0,02	1,03	0,51	0,01	0,18	0,01	0,10	0,00	1,99	0,12	0,00				
Бронзит и ги- перстен	Мончегорск, [3]	0,07	—	0,00	0,00	1,31	0,22	0,002	0,02	0,00	0,00	0,00	1,90	0,04	0,002	0,00	9	
		0,12	—	0,01	0,01	1,63	0,43	0,014	0,03	0,004	0,07	0,04	1,96	0,10	0,004			
	0,04	0,00	0,00	—	0,76	0,37	—	0,00	0,00	0,00	—	0,00	1,87	0,02	0,00	0,00		
Вторичный гиперстен *1	Мигулинская, Липов Куст, *4	0,12	0,02	0,04	—	1,36	0,97	—	0,19	0,02	0,08	—	1,98	0,07	0,03	0,05	—	4
		0,13	—	—	—	1,00	0,61	—	0,00	—	0,00	—	1,92	0,02	—	—		
		0,18	—	—	—	1,01	0,68	—	0,16	—	0,07	—	1,98	0,08	—	—		

П р и м е ч а н и е. В интрузивах Норильск-1 [1] и Талнах [2] имеются гиперстены и пижониты, но их химический состав не определен.

*1 Бывший пижонит; *2—без № 7, 11—14 в [2]; *3 после знака «+» неопубликованные в [5] химические анализы по данным В. А. Ефановой. *4 Устное сообщение В. А. Ефановой.

2. Из перидотита Третинской интрузии сделаны полные химические анализы сосуществующих авгита и бронзита; они содержат соответственно единиц формулы $Fe_{0,25}^{2+}$ и $0,39$; $Mg_{1,08}$ и $1,26$.

Сравнивая количества катионов в формулах, заключаем, что авгиты¹ интрузии Норильск-1 [1] и интрузий юга Восточно-Европейской платформы [5] близки по содержанию Са, мало отличаются по Si и сильно — по Mg и Fe; наиболее магнезиальны мончегорские авгиты; авгиты интрузий юга Восточно-Европейской платформы [5] варьируют от магнезиальных (отвечающих мончегорским) до умеренно железистых (самых железистых среди рассматриваемых).

В мончегорской интрузии развиты преимущественно бронзиты, изредка встречается гиперстен; содержание Са в них достигает предельного у этих минералов. В интрузиях юга Восточно-Европейской платформы бронзита мало, преобладает гиперстен, редок феррогиперстен [6]; содержание Са в четырех гиперстенах отвечает таковому в пижоните; из последнего возник вторичный гиперстен ламеллями клинопироксена, вероятно авгита, так как кристаллы авгита сосуществуют с первичным и вторичным гиперстенами.

Из вариаций количества катионов в формулах пироксенов в согласии с современными представлениями [9—12 и др.] допускаем, что повышенные содержания Са и Fe^{2+} в пироксенах до некоторой степени свидетельствуют об относительно более низкой температуре их кристаллизации, а увеличение количества Al в двух позициях (M1, T) — о возможно более высоком давлении при этом процессе. Распределение Mg, Fe^{2+} между орто- и клинопироксенами, между пироксенами и оливинами, Са, между авгитами и плагиоклазами здесь не учтено из-за отсутствия данных.

Более тонкие кристаллохимические черты пироксенов никеленосных интрузивов вскрываются при расчете (по числам при катионах их формул) гетеровалентных замещений. В настоящее время замещение типа $R_{0,5}^{2+} \rightarrow Ti_{0,5}^{4+} - M1$; $Si_{1,0}^{4+} - Al_{1,0}^{3+} - T$, считавшееся гипотетическим, обнаружено в одном из пироксенов оливиновых базальтов Таити [13], в котором $Ti_{0,25}^{4+}$ находится в позиции M1; $Al_{0,50}^{3+} - T$; недавно выявлено замещение типа $R_{0,5}^{2+} \rightarrow Na_{0,5} - M2$; $R_{0,25}^{2+} \rightarrow Ti_{0,25}^{4+} - M1$ у пироксена из лейцититов Нового Южного Уэльса (Австралия) [14]. Оба эти замещения наряду с более обычными — чермакитового типа $R_{0,5}^{2+} \rightarrow R_{0,5}^{3+}$ в M1; $Si_{0,5}^{4+} \rightarrow R_{0,5}^{8+}$ в T, и эгиринового, жадеитового, юриитового типов: $R_{1,0}^{2+} \rightarrow Na_{1,0}$ в M2 (во всех трех); $R_{1,0}^{2+} \rightarrow Fe_{1,0}^{3+}$, $Al_{1,0}Cr_{1,0}^{3+}$ в M1 (в каждой соответственно) [15] устанавливаются расчетным путем, без применения миналов. При этом уточняется валентность Fe и Ti, размещение их и Al [16] по двум позициям M1 и T, замещение Mg, Fe^{2+} , Mn в M2 и M1. В результате получаются более приемлемые формулы, с которых можно «читать» тонкие отличия кристаллохимии пироксенов и более обоснованно судить о (P-T)-условиях их образования.

Новейшие экспериментальные и теоретические исследования распределения катионов по позициям [9—12] показывают, что с повышением температуры более крупные катионы перемещаются в меньшие по размеру полиэдры; с повышением давления обычно происходит обратное².

Характерной типоморфной особенностью пироксенов никеленосных интрузивов трех районов СССР является весьма слабая изменчивость химического состава, при сильной дифференциации — «расслоенности» горных пород этих интрузивов. Это резко отделяет пироксены рассмот-

¹ Августы здесь названы по количеству Са в M2 [8], бронзиты, гиперстены, феррогиперстен — по соотношению Mg : Fe.

² Исключая сверхвысокие давления взрывных волн, которые здесь, по-видимому, не имели места, хотя доказывается метеоритное происхождение Бушвельдского комплекса в Африке [17].

ренных интрузивов от известных классических примеров Скаергарда (Гренландия) [18], Бушвельда (Африка) [19] и дайки губы Ивандеевской на Мурманском побережье [20]. При разной мощности этих интрузивов (Бушвельда — почти 500 км, Скаергарда — 2,5 км и ивандеевской дайки — 80 м) в их вертикальных разрезах отмечается похожая смена набора пироксенов: снизу вверх четырехпироксеновые горные породы сменяются трех-, двух-, однопироксеновыми. Существенно изменяется и химизм пироксенов: в низах разреза они сильно магниезальные (преобладают бедные кальцием), в верхах разреза они наиболее железистые и самые богатые кальцием. Подобной картины не наблюдается у пироксенов дифференцированных никеленосных интрузивов.

Петрогенетическая роль пироксенов как главных породообразующих минералов, наиболее распространенных в ультраосновных и основных магматических породах, о которых здесь идет речь, имеет и практический аспект: их типоморфные признаки (а именно кристаллохимические) могут быть использованы в качестве поисковых указателей на определенный рудный минерал [21].

Сравним, например, клино- и ортопироксены из никеленосных интрузивов с таковыми из тоже дифференцированных интрузивов с Ti—Fe [22—24 и др.] и Ti [10 и др.] минерализацией. Первые отличаются от вторых, как правило, меньшей железистостью обоих пироксенов и часто — меньшей кальциевостью и глиноземистостью клинопироксенов. Распределение Fe, Cu, Ni между сульфидами и пироксенами [25 и др.] Fe и Ti между окислами и пироксенами [24 и др.] контролируется режимом серы и кислорода, температуры и давления (чему посвящены специальные работы), т. е. μ_0 , $-PT$ и другими изменяющимися факторами равновесия всего периода кристаллизации пироксенов (от раннемагматической до постмагматической), которые предопределяют возможность или невозможность отделения рудных скоплений сульфидов или титаномагнетитов.

Как показано выше, пироксены никеленосных «расслоенных» интрузивов на фоне переменного состава горных пород выделяются относительным постоянством своего состава, что является их характерной кристаллохимической чертой.

Если учесть, что процесс выделения сульфидов в никеленосных интрузивах (как установлено на примере Мончегорского [3 и др.]) и титаномагнетита (в интрузивах Урала [23, 24 и др.]) является «сквозным», т. е. идет от раннемагматической (до силикатной) стадии до постмагматической, включая пегматиты (фазовые, фациальные) и рудные жилы, становится ясной опосредствованная связь кристаллохимического типоморфизма пироксенов с рудообразованием.

Сопоставление формул пироксенов (по их 60 весовым химическим анализам) из нескольких интрузивов трех районов СССР показало следующее.

1. В более или менее дифференцированных интрузивах — основных (Норильск, Талнах) и основных-ультраосновных (Мончегорск, юг Восточно-Европейской платформы) — пироксены имеют близкий химический состав; они почти не изменяются по вертикали, т. е. в разрезах этих интрузивов [1—3 и др.], и мало изменяются со сменой основности горных пород [1—3, 5].

2. По колебаниям содержания катионов в формулах пироксенов, а также по изовалентному и гетеровалентному изоморфизму между катионами сделан вывод о возможных различиях в условиях температуры и давления при кристаллизации этих минералов, что переносится на горные породы, их содержащие.

3. Пироксены дифференцированных никеленосных интрузивов, рассмотренные в статье, кристаллохимически специфичны — они мало изменяются по составу в процессах последовательной их кристаллизации

(при формировании самих интрузивов и связанных с ними постмагматических образований) и тем отличаются от пироксенов других дифференцированных интрузивов, в частности имеющих Ti—Fe (редко Cr—Бушвельд) минерализацию.

4. Отмеченная кристаллохимическая специфика пироксенов, вероятно, должна учитываться при обсуждении вопросов возможной связи с ними сульфидной никеленосной минерализации, а также при обсуждении возможности нахождения этой минерализации и перспектив обнаружения ее в тех или иных интрузивах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин А. Д., Дудыкина А. С., Телешова Р. Л. Некоторые данные о составе породообразующих пироксенов и оливинов габбродолеритовой интрузии Норильск-1.—В кн.: Минералы базитов в связи с вопросами петрогенезиса. М.: Наука, 1970.
2. Годлевский М. Н., Полушкина А. П., Степанов В. К. Моноклинные пироксены Талнахской дифференцированной интрузии.—Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1971, ч. 100, вып. 5.
3. Козлов Е. К. Естественные ряды горных пород никеленосных интрузий и их металлогения. Л.: Наука, 1973.
4. Лихачев В. А., Симон А. К., Зеленщиков В. Г., Терещенко Г. А. Новые данные по геологии и никелености массива Липов Куст.—В кн.: Магматизм и рудообразование. М.: Наука, 1974.
- 5, 6. Ефанова В. А. Кристаллохимические особенности моноклинных пироксенов интрузивных комплексов докембрия севера Ростовской области.—В кн.: Геология и техника геологоразведочных работ в Ростовской области. Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета, 1975.
7. Симон А. К., Зеленщиков Г. В., Терещенко Г. А., Островская М. Е. Формационная принадлежность базит-гипербазитовых массивов юго-востока Русской платформы в свете новых данных.—В кн.: Магматические формации Кавказа и юга Восточно-Европейской платформы. М.: Наука, 1977.
8. Гинзбург И. В. Уточнение систематики пироксенов в свете новых данных о их кристаллохимии.—Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1975, ч. 104, вып. 5.
9. Гинзбург И. В. Новое в кристаллохимии пироксенов и петрогенезис.—В кн.: Актуальные проблемы современной петрографии. Наука, 1974.
10. Гинзбург И. В. Фазы распада пироксена кварцевого габбро Каррок Фил (Северные Пеннины, Англия).—Бюл. МОИП, 1974, ч. XIX, Отд. геол., вып. 6.
11. Wood B. J. Mixing properties of tschermakitic clinopyroxenes.—Amer. Mineral., 1976, v. 61, Nos. 7—8.
12. Callister Mc R. H., Finger L. W., Ohashi Y. Intercrystalline Fe²⁺—Mg equilibria in three Ca-rich clinopyroxenes.—Amer. Mineral., 1976, v. 61, Nos. 7—8.
13. Tracy R. J., Robinson P. Zoned titanian augite in alkali olivine basalt from Thaiti and the nature of titanium substitution in augite.—Amer. Mineral., 1977, v. 62, N 7—8.
14. Ferguson A. K. The natural occurrence aegirine-neptunite solid solution.—Contr. Mineral. Petrol., 1977, v. 60, N 3.
15. Гинзбург И. В. Новое в кристаллохимии пироксенов.—Новые данные о минералах СССР, Вып. 23. М.: Наука, 1974.
16. Ohashi H., Hariya Y. Order-disorder of ferric iron and aluminium in the system CaMgSi₂O₆—CaFeAlSiO₆ of high pressure.—J. Japan assoc. mineral petrol. econom. geol., 1973, v. 5, N 7.
17. Rao A. S. P. Meteoritic origin of ore deposits in layered ultramafic and ultrabasic complex.—IMA-IAGOD meet 1970, Japan Collect. Abstr., 1970.
18. Brown G. M., Vincent E. A. Pyroxenes from the late stages of fractionation of the Skaergaard intrusion, East Greenland.—J. Petrol., 1963, v. 4, N 2.
19. Atkins F. B. Pyroxenes of the Bushveld intrusion, South Africa.—J. Petrol., 1969, v. 10, N 2.
20. Синицын А. В. Пироксены дифференцированной интрузии долеритов.—Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1965, ч. 94, вып. 5.
21. Гинзбург И. В. Практическое значение пироксенов (автореферат доклада). Бюл. МОИП, 1976, ч. XLXI, Отд. геол., вып. 5.
22. Кавардин Г. И. О некоторых особенностях химизма породообразующих минералов основных и ультраосновных пород Кольского полуострова.—Изв. Карельск. и Кольск. фил. АН СССР, 1959, № 2.
23. Мясников В. С., Карпова О. В. К минералогии силикатных и рудных минералов Копанского габбрового массива.—В кн.: Минералы базитов в связи с вопросами петрогенезиса. Наука, 1970.
24. Штейнберг Д. С., Фоминых В. Г. Клинопироксены из пироксенитов Качканара (Урал).—Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1967, ч. 96, вып. 2.
25. Годлевский М. П. Соотношение сульфидной и силикатной части в ходе эволюции основной магмы.—Тезисы докл. МГК. Москва, 1971, ВИНИТИ, 1971.