

## МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭПГ И РЗЭ В ЖЕЛЕЗНОМ МЕТЕОРИТЕ ЧЕДЕР (*Tuva*)

Л.В. Агафонов<sup>1</sup>, В.А. Попов<sup>2</sup>, Г.Н. Аношин<sup>1,3</sup>, Л.Н. Поспелова<sup>1</sup>,  
В.И. Забелин<sup>2</sup>, В.И. Кудрявцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,  
667007, Кызыл, ул. Интернациональная, 117а, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Приведены результаты изучения минерального состава и внутреннего строения метеорита Чедер, обнаруженного в 23 км к югу от города Кызыл. По своей структуре метеорит отвечает среднеструктурному октаэдриту. Максимальные размеры его составляют  $26 \times 9 \times 8$  см при весе 5.39 кг. Он имеет обтекаемую оплавленную поверхность. На одной из сторон метеорита, вероятно, обращенной к направлению полета, наблюдаются регмаглипты и видна извилистая каверна размером  $9 \times 1.5$  см. Метеорит состоит главным образом из камасита с примесью тэнита. Периферия балок видманштеттеновых структур сложена тэнитом, а внутренняя их часть имеет сложный камасит-тэнитовый состав. В небольших объемах в виде разнообразных по форме и величине выделений в камасите присутствуют фосфиды, среди которых по соотношению никеля и железа выделено три типа. Мелкие бесформенные червеобразные зерна, которые обычно относят к рабдитам, представлены высоконикелистой разновидностью — никельфосфидом. Во всех минералах метеорита установлен кобальт до 0.67 мас. %, и в отдельных случаях медь и фосфор, на уровнях, лишь незначительно превышающих пределы обнаружения. Общее содержание ЭПГ превышает в несколько раз объем платиноидов в хромититах — одном из носителей ЭПГ в земных условиях. Среди РЗЭ в метеорите преобладают тяжелые элементы. Общее количество РЗЭ на два порядка ниже, чем в хондрите C1.

*Камасит, тэнит, метеорит, регмаглипт, плексит.*

## THE CHEDER IRON METEORITE (*Tuva*): MINERAL COMPOSITION, STRUCTURE, AND PGE AND REE CONTENTS

L.V. Agafonov, V.A. Popov, G.N. Anoshin, L.N. Pospelova, V.I. Zabelin, and V.I. Kudryavtsev

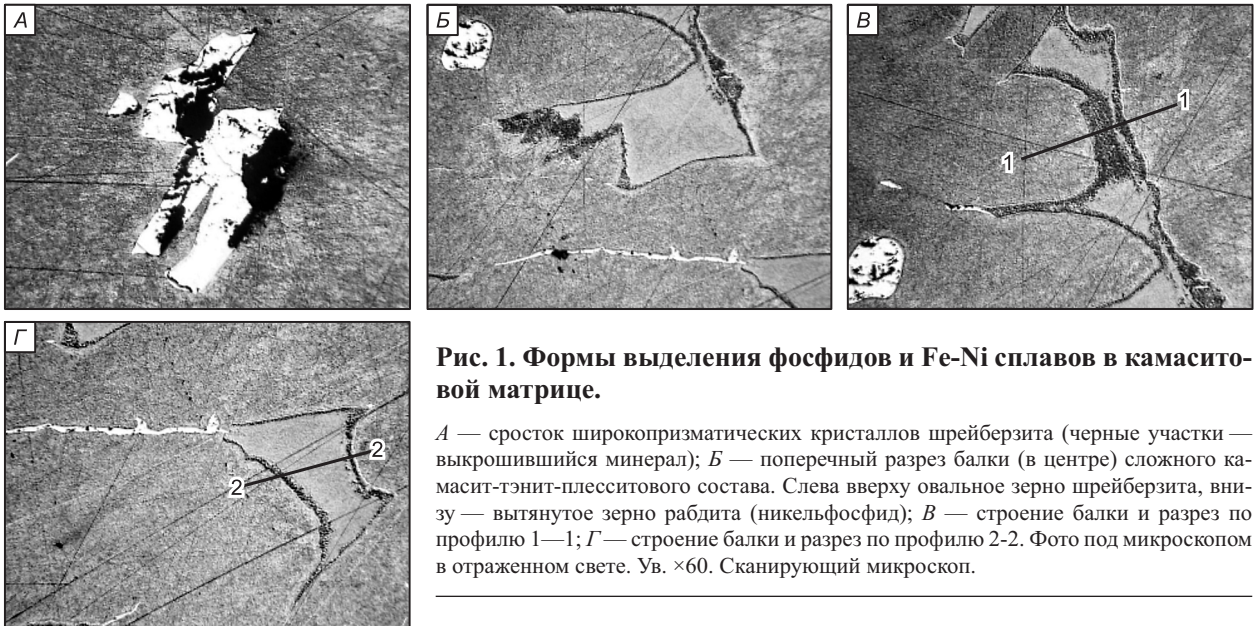
The Cheder meteorite, found 23 km south of Kyzyl, has been studied in terms of mineral composition and internal structure. Structurally, it is a medium octahedrite, which measures  $26 \times 9 \times 8$  cm and weighs 5.39 kg. Its surface is streamlined and features flow lines. One of the sides, probably that facing the flight direction, features regmaglypts and a sinuous cavern ( $9 \times 1.5$  cm). The meteorite consists of kamacite admixed with taenite. The inside of Widmanstätten bands is of complex kamacite-taenite composition and flanked by taenite lamellae. Phosphides are present in kamacite in small amounts as variously sized and shaped bodies. They are divided into three types depending on the Ni/Fe ratio. Small shapeless wormlike grains, which are usually assigned to rhabdites, consist of nickelporphide (Ni-rich variety). All the minerals in the meteorite contain Co (up to 67 wt.%) and, sometimes, Cu and P (slightly above the detection limit). The total PGE content of the meteorite is several times higher than that of chromitites, which are one of the terrestrial PGE sources. The REE in the meteorite are dominated by HREE. The total REE content of the meteorite is lower than that of chondrite C1 by two orders of magnitude.

*Kamacite, taenite, meteorite, regmaglypt, plessite*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТЕОРИТА

26 октября 2003 г. при обследовании окрестностей г. Кызыл сотрудниками ТувИКОПР СО РАН в 23 км к югу от города, в точке с координатами  $94^{\circ}36'$  в.д. и  $51^{\circ}32'$  с.ш. был обнаружен железный метеорит [Попов и др., 2004]. От места падения известного метеорита Чинге [Агафонов и др., 1997] эта находка расположена в 50 км к северу. Масса метеорита 5.39 кг, объем около 0.6 дм<sup>3</sup>. Максимальные размеры в трех измерениях составили  $26 \times 9 \times 8$  см. Метеорит назван Чедер по месту находки вблизи соленого озера с таким названием.

Метеорит Чедер имеет светло-серую окраску с пятнами серо-коричневого до черного цвета. В свежем срезе имеет металлический оловянно-белый блеск, а на поверхности среза отмечаются мелкие



**Рис. 1. Формы выделения фосфидов и Fe-Ni сплавов в камаситовой матрице.**

*А* — сrostок широкопризматических кристаллов шрейберзита (черные участки — выкрошившийся минерал); *Б* — поперечный разрез балки (в центре) сложного камасит-тэнит-плекситового состава. Слева вверху овальное зерно шрейберзита, внизу — вытянутое зерно рабдита (никельфосфид); *В* — строение балки и разрез по профилю 1—1; *Г* — строение балки и разрез по профилю 2-2. Фото под микроскопом в отраженном свете. Ув.  $\times 60$ . Сканирующий микроскоп.

(1—2 мм) пустоты, обусловленные выкрошиванием зерен шрейберзита при распиловке (рис. 1, *А*). Метеорит имеет неправильную удлинненную треугольную форму. Более широкий его конец закруглен и покрыт темно-коричневой (до черной) корочкой. Одна из сторон метеорита, вероятно, обращенная к направлению полета, покрыта регмаглиптами и в средней части осложнена каверной размером  $9 \times 1.5$  см. По ширине с закругленного конца метеорит имеет больший размер, чем с противоположной, несколько увеличиваясь в средней части. Сторона, противоположная обработанной регмаглиптами, уплощена и не несет следов воздействия высоких температур. На поверхности закругленного участка наблюдаются частые параллельные полосы (штриховка), направленные под углом к длинной оси метеорита. По центру метеорита проходит тонкий прямой след, наблюдаемый на закругленной поверхности. Не исключено, что по плоскости, проекция которой видна в виде следа на поверхности метеорита, произошел сдвиг от удара в неземных условиях, когда метеорит имел высокую температуру, при которой произошло пластическое скольжение без нарушения сплошности. На протравленном срезе метеорита это проявилось в виде неймановых линий, по которым под углом к направлению балок зафиксировано смещение отдельных фрагментов (рис. 2). Следов ударного воздействия в земных условиях на метеорите и на месте его находки не обнаружено. Он лежал среди раздувов золотого песка, мощность которого в данном месте достигает 2—3 м.

Метеорит магнитен. Радиоактивность его соответствует фону — около 10—15 мкР/ч. Удельный вес метеорита  $7.88 \text{ г/см}^3$ . Уплощенная сторона, на которой лежал метеорит, покрыта пятнами корочек лимонита, захватившего частицы песка. Лимонит присутствует также в каверне и в значительно меньших количествах на стороне, покрытой регмаглиптами.

От узкой части метеорита были отпилены два небольших фрагмента. Один из них использован для анализов, а второй остался в музее ТувИКОПР СО РАН (Кызыл). Основная масса метеорита передана в метеоритную коллекцию РАН. В 2004 г. место находки было обследовано сотрудниками комитета по метеоритам РАН с использованием специальных приборов. Поиски затруднялись присутствием здесь значительного количества металла от сельскохозяйс-



**Рис. 2. Видманштеттеновая структура одного из срезов метеорита Чедер. Ув.  $\times 10$ .**

С правой стороны наблюдаются неймановы линии. Протравлено парами слабоконцентрированной  $\text{HNO}_3$ .

Таблица 1.

Химический состав метеорита Чедер, мас. %

Fe*	Ni*	Co*	P <sup>+</sup>	Cr*	Mn*	Cu*	Ga*	Ge*
88.2	10.5	0.55	0.17	49·10 <sup>-4</sup>	12.8·10 <sup>-4</sup>	539·10 <sup>-4</sup>	131·10 <sup>-4</sup>	148·10 <sup>-4</sup>
Ca*	As*	Mo*	Ru*	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
15.8·10 <sup>-4</sup>	16.1·10 <sup>-4</sup>	15.4·10 <sup>-4</sup>	28.3·10 <sup>-4</sup>	1.7·10 <sup>-4</sup>	2.0·10 <sup>-4</sup>	12.0·10 <sup>-4</sup>	19.0·10 <sup>-4</sup>	15.0·10 <sup>-4</sup>
Zn <sup>++</sup>	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	
550·10 <sup>-4</sup>	0.042·10 <sup>-4</sup>	0.081·10 <sup>-4</sup>	0.010·10 <sup>-4</sup>	0.036·10 <sup>-4</sup>	0.009·10 <sup>-4</sup>	0.001·10 <sup>-4</sup>	0.005·10 <sup>-4</sup>	
Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Re	Сумма
0.001·10 <sup>-4</sup>	0.004·10 <sup>-4</sup>	0.001·10 <sup>-4</sup>	0.002·10 <sup>-4</sup>	0.0003·10 <sup>-4</sup>	0.002·10 <sup>-4</sup>	0.0003·10 <sup>-4</sup>	1.5·10 <sup>-4</sup>	99.58

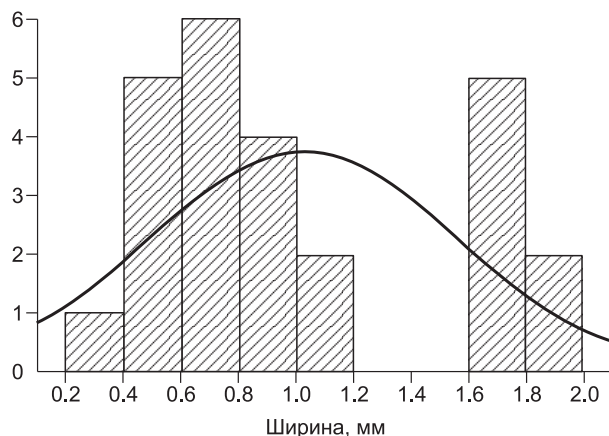
Примечание. Элементы, отмеченные точкой, проанализированы рентгенофлуоресцентным методом на синхротронном излучении ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН; Zn<sup>++</sup> — (ИСП-АЭС) — атомно-эмиссионным анализом с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре IRIS (Thermo Jarrell Ash) США; остальные элементы анализировались (ИСП-МС) — методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра высокого разрешения Element фирмы Finnigan (Германия).

твенной техники. Тем не менее они пришли к выводу, что найденный метеорит, вероятно, является единственным остатком небесного тела.

Метеорит Чедер состоит главным образом из четырех элементов: Fe, Ni, Co и P (табл. 1), сумма которых составляет 99.42 мас. % и определяется такими слагающими метеорит Fe-Ni сплавами, как камасит, тэнит, и их тонкими сростаниями. В акцессорных количествах присутствуют фосфиды: шрейберзит и его разновидность — рабдит. Других минералов, встречающихся в железных метеоритах, в частности, сульфидов, оксидов и силикатов, в метеорите Чедер не установлено. Из элементов-примесей в наибольших количествах присутствуют медь, цинк, галлий и германий (см. табл. 1), составляя в сумме 0.1368 мас. %. Количество редкоземельных элементов равно  $0.01946 \times 10^{-4}$  мас. %, а элементы платиновой группы в сумме составляют 0.0078 мас. %. На долю оставшихся элементов: Cr, Mn, Ca, As, Mo, Re приходится  $110.6 \times 10^{-4}$  мас. %. Общая сумма определенных элементов равна 99.58 мас. %.

### МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ФАЗЫ МЕТЕОРИТА И ЕГО СТРУКТУРА

Известно, что структурно-химическая классификация железных метеоритов проводится по ширине полос видманштеттеновых структур и содержанию Ni в метеорите [Соботович, Семенов, 1984; Додд, 1986]. В нашем случае содержание никеля составляет 10.5 мас. %. Что же касается ширины балок, то на основании двух срезов метеорита выявляется довольно широкое варьирование этого параметра (рис. 3). Из 25 замеров минимальное значение составило 0.4 мм, а максимальное значение 2 мм. Наиболее часто встречающаяся ширина 0.5—0.85 мм. Общий вид распределения ширины балок приведен на рис. 3. Как видно, кривая распределения имеет бимодальный вид с параметрами, не отвечающими нормальному распределению ( $A/\delta_A = 4.6$ ;  $E/\delta_E = 3.86$ ) [Родионов, 1964]. Такой характер распределения может свидетельствовать о двух событиях, знаменующих термическую историю метеорита Чедер в космосе. Исходя из ширины балок и содержания никеля структура метеорита наиболее близка к среднеструктурным октаэдритам (Om) химической группы IID [Соботович, Семенов, 1984].



Общий химический состав метеорита Чедер по основным компонентам близок к составу палласового железа [Дьяконова и др., 1979] (см. табл. 1).

Основная масса метеорита сложена камаситом с минимальным содержанием никеля 5.54 мас. % и максимальным 8.15 мас. %. Из общего содержания Ni в метеорите Чедер (10.5 мас. %) следует, что в нем должно присутствовать значительное количество тэнита. Поскольку четких границ по содержанию никеля и железа в тэните и камасите не су-

Рис. 3. Распределение ширины камаситовых балок метеорита Чедер.

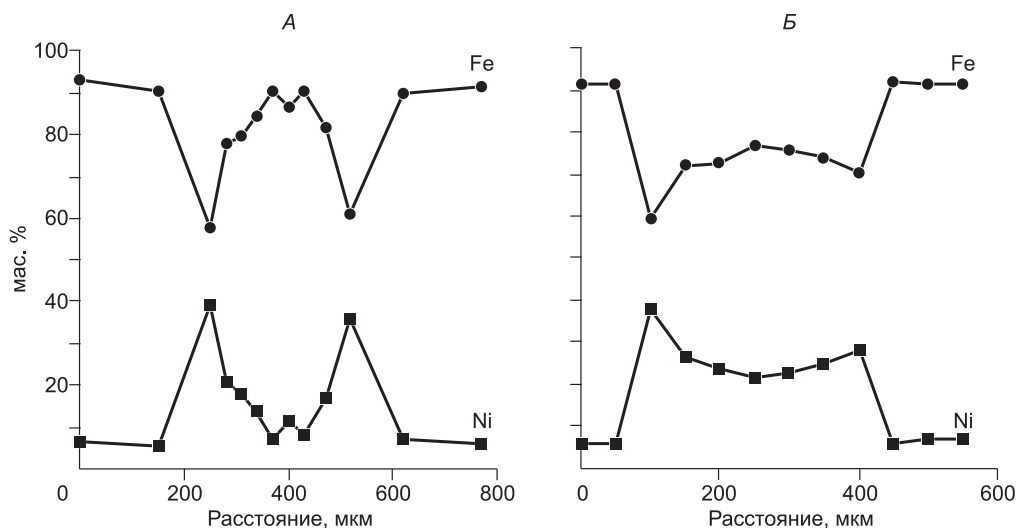


Рис. 4. Состав и строение балок по профилям 1—1 (А) и 2—2 (Б). См. рис. 1, В, Г.

По данным рентгеноспектрального анализа.

существует, а проводить каждый раз рентгеноструктурные исследования для идентификации фазы не представляется возможным, то количество никеля в них часто устанавливается произвольно. Поэтому содержание никеля в плессите тоже не имеет определенного значения. В нашем случае нижний предел количества никеля в тэните установлен в 25 мас. %. Интервал от 8.15 до 25 мас. % Ni отвечает плесситу. Содержания Ni от 8.15 и ниже будут соответствовать камаситу. Исходя из этого, при колебаниях содержания никеля в камасите от 5.54 до 8.15 мас. %, количество тэнита в метеорите варьирует от 20 до 9 мас. % соответственно. Учитывая более высокое содержание никеля в тэните, достигающее до 38.83 мас. %, можно полагать, что общее количество тэнита в метеорите не превышает 15% объема. Дополнительный вклад в содержание никеля в метеорите вносят также фосфиды, в которых количество никеля колеблется от 20 до 48 мас. %. Основная масса высоконикелистого тэнита фиксируется по периферии балок, зерен фосфидов и линзовидных эмбрионов камасита.

Остановимся более подробно на строении названных образований. Обычно, рассматривая приведенные в печатных работах балки видманштеттеновых структур, поражаешься совершенству их строения и строго научному объяснению их состава и происхождения. Однако на примере метеорита Чедер можно видеть, что не всегда все в природе так закономерно и повторяемо. Так, срезы метеорита Чедер в другой плоскости показали отсутствие видманштеттеновых структур, а среди основной камаситовой массы обозначились лишь отдельные фрагменты, которые можно было рассматривать как поперечный срез отдельных балок, не связанных структурно. Сказанное свидетельствует также о неоднозначном классификационном определении типа метеорита. Внутренний состав балок и их строение были исследованы на сканирующем электронном микроскопе и рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax-Micro. Как видно (см. рис. 1, А—Г), балки имеют сложное строение, которое проявляется при травлении. Во всех случаях периферия балок сложена тонкой каймой тэнита с переменной толщиной от 2 до 10 мкм. По составу балка (см. рис. 1, В, профиль 1—1) характеризуется асимметричностью. За каймой тэнита следует плессит с понижающимся содержанием никеля вплоть до камасита. Затем наблюдается тонкая полоска плессита, камасита и постепенное увеличение никеля до состава тэнита в кайме. В основной массе проанализированный камасит имеет довольно близкий состав (рис. 4, табл. 2).

По профилю 2—2 (см. рис. 1, Г) состав внутренней части балки изменяется симметрично. Здесь также периферийная кайма имеет тэнитовый состав с высоким содержанием никеля, которое к центру падает до состава плессита. К противоположной стороне количество никеля возрастает до максимального значения в кайме (см. рис. 4).

Как следует (см. рис. 1, Б—Г), балки имеют переменную ширину и сопровождаются многократными ответвлениями по длине. Эти ответвления обрываются острыми окончаниями и на продолжении некоторых из них фиксируются выделения высоконикелистого фосфида. Последние могут прерываться, но их направление сохраняется. Более темная окраска основной массы, вмещающей светлую балку, свидетельствует о более высоком содержании никеля в последней. В отдельных случаях остроугольные ответвления разных балок соединяются протяженными тонкими зернами рабдита (никельфосфида). Более детальное строение фрагмента одной из балок показано на рис. 5. По ее периферии отчетливо про-

Таблица 2. Химический состав минералов Ni-Fe по профилю вкрест балок, мас. %

№ п/п	Fe	Co	P	Ni	Cu	Сумма
<b>Профиль 1</b>						
1	93.06	0.65	Не обн.	6.56	Не обн.	100.27
2	90.58	0.65	0.15	5.74	»	97.12
3	57.80	0.15	0.02	38.83	0.29	97.09
4	77.69	0.47	0.02	20.72	0.09	98.99
5	79.14	0.50	0.02	18.15	0.09	97.90
6	84.22	0.53	Не обн.	13.83	0.05	98.63
7	90.50	0.67	»	7.27	Не обн.	98.44
8	86.49	0.65	»	11.79	0.05	98.98
9	90.61	0.66	0.02	8.15	Не обн.	99.44
10	81.48	0.56	0.02	16.51	0.08	98.66
11	60.79	0.21	Не обн.	35.49	0.20	96.69
12	90.22	0.61	0.03	7.46	Не обн.	98.32
13	91.85	0.67	0.02	6.18	»	98.72
<b>Профиль 2</b>						
1	91.72	0.66	0.02	5.75	Не обн.	98.15
2	91.55	0.61	Не обн.	5.76	0.05	97.97
3	59.29	0.16	0.03	37.91	0.19	97.58
4	72.50	0.29	0.02	26.40	0.10	99.31
5	72.57	0.34	Не обн.	23.94	0.07	96.92
6	76.92	0.36	0.02	21.73	0.08	99.11
7	75.81	0.30	0.02	22.51	0.10	98.74
8	73.98	0.35	0.02	25.01	0.07	99.43
9	70.44	0.25	0.02	27.79	0.09	98.59
10	92.13	0.65	Не обн.	5.54	Не обн.	98.32
11	91.68	0.68	0.02	6.55	»	98.93
12	91.92	0.70	0.02	6.85	»	99.49

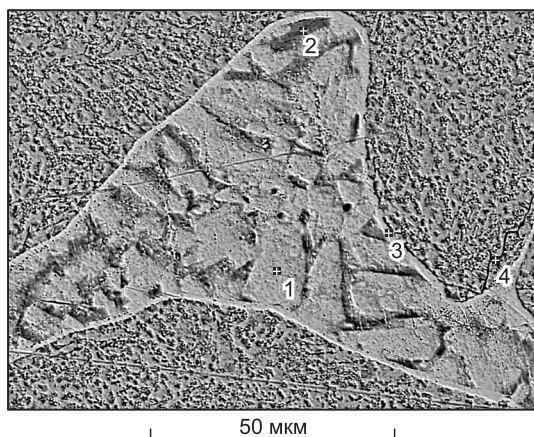
Примечание. Профиль 1: 1, 2, 7, 9, 12, 13 — камасит; 3, 11 — тэнит; 4—6, 8, 10 — плессит. Профиль 2: 1, 2, 10—12 — камасит; 3, 4, 8, 9 — тэнит; 5—7 — плессит. Не обн. — не обнаружено.

Во многих случаях внутри камасита основной массы наблюдаются своеобразные эмбриональные линзовидные выделения этого же минерала, несколько обедненного никелем. Как видно на рис. 7 (спектры 1—3), максимальная длина линзочек достигает 40 мкм, минимальная 10. Различия в содержании никеля можно видеть по более светлой матрице, содержащей больше никеля. Четкой ориентировки линзочек не наблюдается, хотя предпочтительная диагональная директивность на рис. 8 очевидна. Только единичные мелкие линзочки имеют горизонтальное направление. Внутренняя часть линзочек, содержащая низкое количество никеля, окружена тонкой каймой около 1 мкм тэнита (см. рис. 8, спектр 3). Данный факт трудно объяснить с генетической точки зрения, однако он может предположительно свидетельствовать о вторичной природе линзочек, возникших на каком-то этапе формирования родительского тела или его распаде.

Наряду с железом и никелем, при изучении разреза балок проводилось определение кобальта, фосфора и меди. Как видно (см. табл. 2), в наибольших количествах кобальт содержится в камасите и в наименьших в тэните. В плессите, который является смесью камасита и тэнита, его содержание имеет промежуточное значение. Напротив, медь максимально зафиксирована в тэните и, соответственно, по вышеназванной причине, в меньших количествах в плессите. В камасите в большинстве случаев медь не установлена. Положительная корреляция кобальта с железом и отрицательная с никелем свидетельствует о предпочтительном вхождении кобальта в структуру твердых растворов с низким содержанием ни-

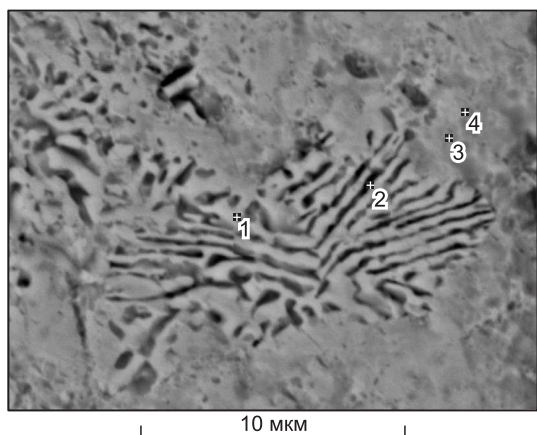
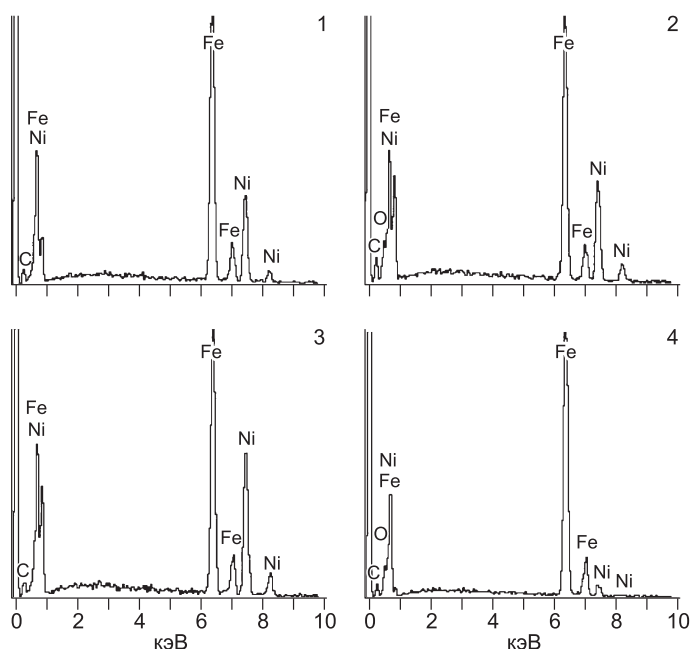
слеживается тонкая полоска тэнита с повышенным содержанием никеля (спектр 3), включающая мелкие зерна никельфосфида, иногда прерываемая ими. Следует отметить, что окончания выклинивающихся ответвлений тоже сложены тэнитом, в которые он продолжается. Основная камаситовая вмещающая масса равномерно покрыта бесформенными мелкими темными и светлыми участками, отражающими неоднородный состав камасита по никелю. В этой связи необходимо обратить внимание на тэнитовую кайму — она на всем протяжении не несет следов травления, хотя по ее внутренней границе в левой части рисунка можно наблюдать черные точки никельфосфида, выявленные при травлении. Примечательна внутренняя структура травления балок. Если бы состав балки был однородным по ширине, то это нашло бы свое отражение в получаемом рисунке травления. Мы наблюдаем остроугольные формы вытравленного (см. рис. 5, спектр 2) и сохранившегося (спектр 1) тэнита, имеющего одинаковый состав. По нашему мнению, это связано с внутрикристаллическими напряжениями и сопутствующими им структурными деформациями, возникшими при кристаллизации Ni-Fe сплавов в родительском теле. Участки со структурными дефектами более легко подвергались травлению. В правой части рис. 5 видна трещинка, залеченная сплавом, приближающимся по составу к железу с ограниченной примесью никеля (спектр 4). Судя по взаимоотношению балки и трещинки, которая утыкается в тэнитовую кайму, последняя возникла позже и, вероятно, связана с шокowym ударом и частичным подплавлением, состав которой обогатился железом.

Вероятно, к этому же типу образований относятся формы, выявленные при травлении тэнита внутри балок (рис. 6), характеризующиеся радиально-лучистым строением, напоминающим структуры распада твердых растворов. Согласно энергодисперсионным спектрам (1—4), светлые и темные участки имеют одинаковый состав, за исключением точки 1, где в тэните несколько повышено содержание никеля.



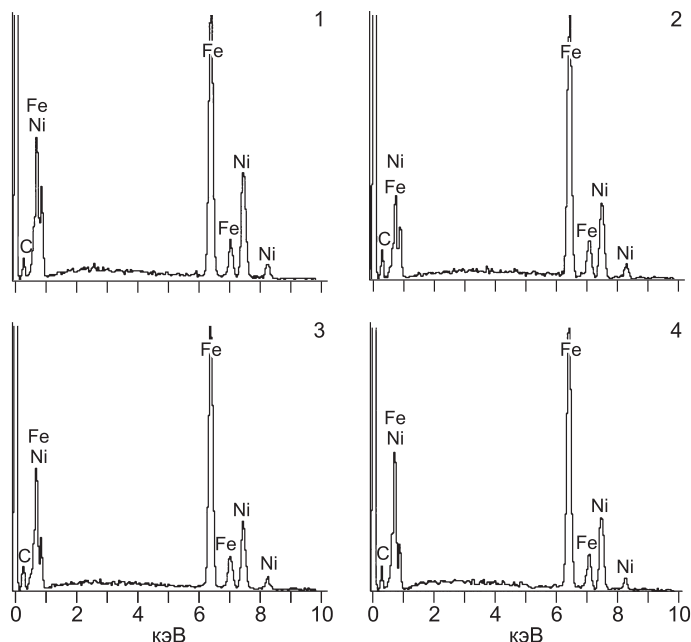
**Рис. 5. Увеличенный фрагмент мелкой балки, протравленной парами слабоконцентрированной  $\text{HNO}_3$ .**

1—4 — места съемки энергодисперсионных спектров (здесь и далее на рис. 7, 8, 9 — электронный сканирующий микроскоп LEO1430VP).



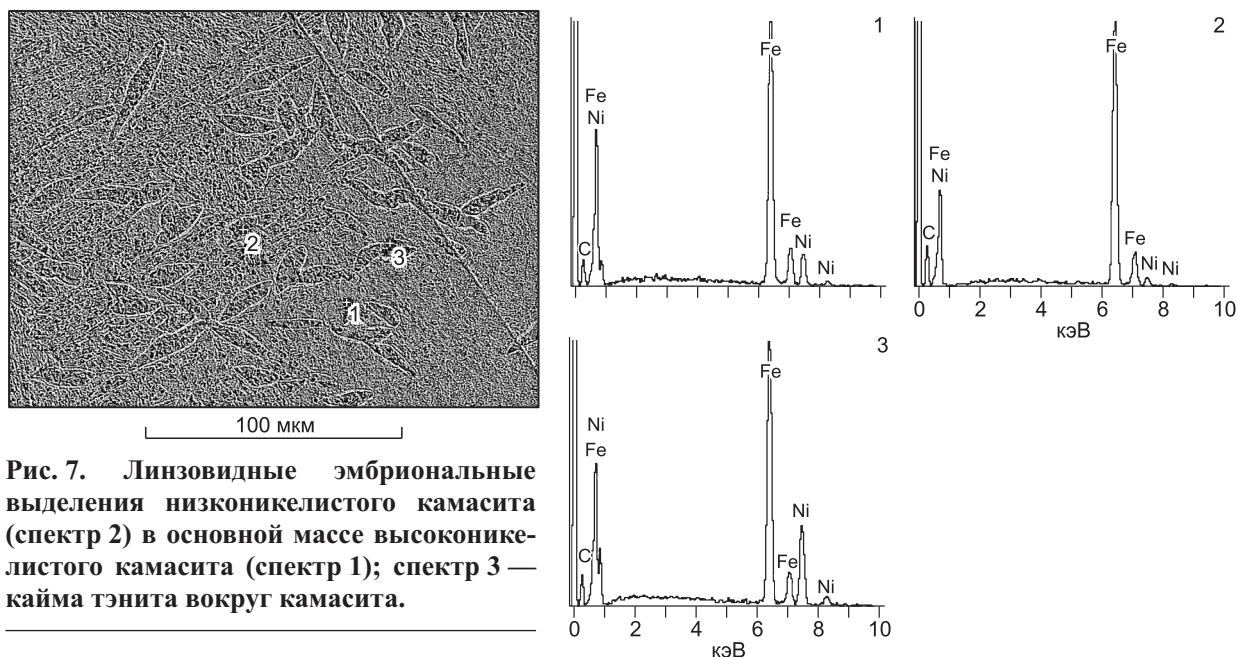
**Рис. 6. Формы травления тэнита со структурами радиально-лучистого строения внутри балки.**

1—4 — места съемки энергодисперсионных спектров.



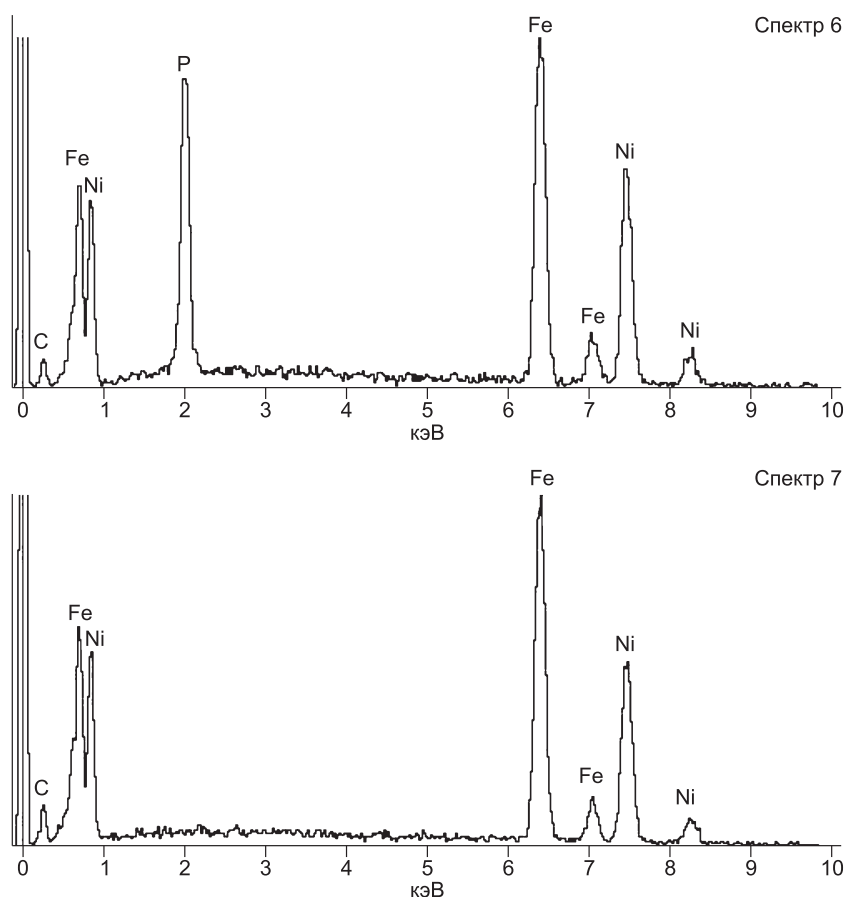
келя. Другими словами, если говорить о минералах, то в их структуре кобальт замещает никель. Медь же, исходя из корреляционных связей, замещает кобальт, что особенно хорошо видно на примере анализов профиля 1, где суммарное количество меди и кобальта приближается к постоянной величине. Таким образом, для камасита характерно высокое содержание кобальта и практически полное отсутствие меди. В тэните, напротив, повышено содержание меди и понижено содержание кобальта. В плессите содержание кобальта и меди характеризуются промежуточными значениями между тэнитом и камаситом. Что касается фосфора, то его содержание во всех фазах лишь незначительно превышает предел обнаружения (0.015 мас. %), поэтому установить какую-либо закономерность в его содержаниях в Fe-Ni сплавах не представляется возможным. Более высокие его значения, вероятно, обусловлены мельчайшими включениями фосфидов.

Исходя из общего состава метеорита и состава балок видманштеттеновых структур, а также толщины балок можно оценить скорость охлаждения метеорита Чедер. Авторы, предложившие методы определения скорости охлаждения [Short, Goldstein, 1967; Goldstein, Short, 1967], указывают, что они наиболее подходят к среднеструктурным октаэдритам с хорошо выраженной видманштеттеновой структурой. Оценки основаны на использовании фазового равновесия и коэффициентов диффузии в системе



**Рис. 7.** Линзовидные эмбриональные выделения низконикелистого камасита (спектр 2) в основной массе высоконикелистого камасита (спектр 1); спектр 3 — кайма тэнита вокруг камасита.

Fe—Ni. В первом методе, названном авторами приблизительным, используется толщина камаситовой полоски и общее содержание никеля (мас. %) в метеорите, которое в нашем случае составляет 10.5 мас. % (см. табл. 1). По толщине пластинки разбились на две группы, которые образуют бимодальное распределение (см. рис. 4). В первой группе толщина составила 0.4—1.2, во второй — 1.7—2 мм. Исходя из этого скорости охлаждения составили соответственно 5—0.8 и 0.25 — 0.2°C/10<sup>6</sup> лет и, возможно, менее.



**Рис. 8.** Энергодисперсные спектры фосфида (сп. 6) и тэнитовой каймки вокруг него (сп. 7).

На основании второго метода скорость охлаждения, описываемая формулой  $\lg_{10} = 4.77 - 0.104 C_{\max}$  в тэните, где максимальная концентрация никеля ( $C$ ) в нашем случае равна 38.83 мас. % (см. табл. 2, профиль 1), составила  $5.36^\circ\text{C}/10^6$  лет. Средняя скорость охлаждения по первому методу составила (средняя толщина полосы — 1.02 мм) около  $1^\circ\text{C}/10^6$  лет.

На основании полученных цифр можно предполагать существование двух термических периодов в истории метеорита Чедер. Один и, вероятно, более продолжительный был связан с медленным остыванием внутри прототела со скоростью  $1^\circ\text{C}/10^6$  лет, а второй более кратковременный с быстрым остыванием  $5.36^\circ\text{C}/10^6$  лет, по-видимому, связан с разрушением этого тела.

### ФОСФИДНЫЕ МИНЕРАЛЫ МЕТЕОРИТА

Р.С. Кларк и Дж.У. Гольдштейн [1978], изучая рост шрейберзита в грубоструктурных октаэдриках, установили четыре типа фосфидов по температурным условиям кристаллизации. Первый тип — кристаллизация и рост массивного шрейберзита при медленном охлаждении от температур выше  $850^\circ\text{C}$ ; кристаллизация второго типа шрейберзита проходила в камасите при равновесных условиях в интервале  $600\text{—}500^\circ\text{C}$ , и возможно, при еще более низких температурах. Третий тип включает формирование шрейберзита в процессе камасит-тэнитового взаимодействия вдоль границ их зерен в температурном интервале, начиная с  $500^\circ\text{C}$  или незначительно выше. Вокруг его зерен располагается тэнитовая кайма. Четвертый тип — образование микроабдита при температуре  $400^\circ\text{C}$  и, возможно, ниже. Согласно фазовым диаграммам системы Fe—Ni [Owen, Liu, 1949], в этом же направлении (снижение температур кристаллизации) в формирующихся фазах фосфидов при постоянном содержании фосфора должно возрастать количество никеля.

Химический состав фосфидов никеля и железа в метеорите Чедер колеблется в широких пределах, проявляясь главным образом во взаимном замещении никеля и железа при почти постоянном содержании фосфора. Исключение составляют высокожелезистые разности, в которых в отдельных случаях количество фосфора несколько понижено (табл. 3). При исследовании фосфидов Fe и Ni было отмечено, что при просмотре полированных образцов шрейберзит трудно идентифицируется под микроскопом из-за одинаковой отражательной способности Fe—Ni сплавов и фосфидов. Однако при напылении углеродом под микроскопом микроанализатора (четко выделились три фазы Fe—Ni фосфидов: 1) темно-серые в основном крупные округлые и таблитчатые зерна; 2) светло-серые разнообразной формы выделения шрейберзита; 3) ярко-белые мелкие бесформенные и червеобразные зерна фосфидов. Как видно (см. табл. 3), разные по цвету фосфиды разделились по составу также на три группы: 1 — темно-серые высокожелезистые и низконикелевые; 2 — светло-серые с умеренным содержанием никеля и железа; 3 — белые низкожелезистые—высоконикелевые. Вторая группа по составу является промежуточной между первой и третьей. Как и в случае с Fe—Ni сплавами, содержание кобальта понижается в фосфидах одновременно со снижением железа и увеличением никеля, т.е. кобальт изоморфно замещает никель. Хром в фосфидах фактически отсутствует. Медь в высокожелезистых разностях не установлена, но с повышением содержания никеля, начинает появляться в незначительных количествах. В отдельных зернах фосфидов отмечаются близкие к пределам обнаружения количества серы и серебра (см. табл. 3).

Ранее в метеорите Батлер был установлен высоконикелевый аналог шрейберзита — никельфосфид [Бритвин и др., 1999]. По данным этих авторов, область никельфосфида начинается с содержания Ni — 43.4 мас. % и при расчете на кристаллохимическую формулу никель преобладает над железом.

Согласно анализу, ярко-белые бесформенные и червеобразные зерна, которые по своей морфологии и малому размеру обычно относят к рабдиту или микроабдиту [Clarke, Goldstein, 1978], оказались высоконикелевым фосфидом [Бритвин и др., 1999]. В их составе количество никеля варьирует в пределах 43.44—47.98 мас. %, а количество кобальта от 0.08 до 0.12 мас. %. Разновидности с более высоким содержанием никеля, присутствующие в метеорите Батлер, в метеорите Чедер не установлены. В среднеструктурном октаэдрике Кэнтон Каунти, похожем по структуре на метеорит Чедер, состав никельфосфида приближается к изученному. Близок состав никельфосфида метеорита Чедер и к никелевым фосфидам других железных метеоритов Каньон Дьябло, Карлтон, Ленарто и Монаханс [Бритвин и др., 1999].

Отметим, что вокруг светло-серых зерен фосфидов отмечаются более светлые каемки тэнита (см. рис. 8, спектры 6, 7). Несмотря на то, что содержание никеля в тэните меньше, чем в фосфиде, в отраженных электронах тэнит выглядит светлее из-за большей суммарной интенсивности, обусловленной присутствием большого количества фосфора в фосфиде.

Аргументированность выделения трех видов фосфидов в метеорите Чедер подтверждается содержаниями железа, никеля и кобальта, значения которых не перекрываются.

Тип 1 Fe — 2.20—2.44; Ni — 0.72—0.83; Co — 0.30—0.40 мас. %.

Тип 2 Fe — 1.90—1.96; Ni — 1.04—1.08; Co — 0.13—0.18 мас. %.

Тип 3 Fe — 1.33—1.49; Ni — 1.49—1.65; Co — 0.08—0.12 мас. %.

Fe и Ni приведены в формульных количествах (табл. 3).



Таблица 3. Химический состав (мас. % и кристаллохимическая формула) фосфидов никеля и железа

№ п/п	Fe	Co	P	Cr	Ni	Cu	Сумма	Кристаллохимическая формула в пересчете на 4 атома
<b>Темно-серые</b>								
1	63.69	0.34	11.98	0.03	22.65	Не обн.	98.69	$(\text{Fe}_{2.38}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.80})_{3.19}\text{P}_{0.81}$
2	65.51	0.34	11.59	0.02	22.36	»	99.82	$(\text{Fe}_{2.43}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.79})_{3.23}\text{P}_{0.77}$
3	60.62	0.30	14.90	Не обн.	20.32	0.03	96.17	$(\text{Fe}_{2.27}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.72})_{3.00}\text{P}_{1.0}$
4	60.00	0.32	14.59	»	21.37	0.02	96.30	$(\text{Fe}_{2.24}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.76})_{3.01}\text{P}_{0.98}$
5	61.55	0.39	14.48	»	21.42	0.03	97.87	$(\text{Fe}_{2.20}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.73})_{2.94}\text{P}_{0.93}$
6	60.72	0.35	14.74	0.01	20.32	0.04	96.18	$(\text{Fe}_{2.27}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.72})_{3.00}\text{P}_{0.99}$
7	66.10	0.39	11.66	0.02	22.13	0.04	100.34	$(\text{Fe}_{2.44}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.78})_{3.23}\text{P}_{0.77}$
8	63.43	0.34	13.10	0.01	19.88	0.02	96.78	$(\text{Fe}_{2.37}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.72})_{3.10}\text{P}_{0.90}$
9	65.46	0.40	11.43	0.01	22.19	0.02	99.51	$(\text{Fe}_{2.43}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.79})_{3.23}\text{P}_{0.77}$
10	60.32	0.35	12.82	0.01	22.92	Не обн.	96.42	$(\text{Fe}_{2.28}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{0.83})_{3.12}\text{P}_{0.88}$
<b>Светло-серые</b>								
11	53.75	0.17	15.16	0.01	30.77	0.04	100.30	$(\text{Fe}_{1.95}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.05})_{3.01}\text{P}_{0.99}$
12	53.89	0.13	15.54	0.01	30.74	0.06	100.37	$(\text{Fe}_{1.94}\text{Ni}_{1.05})_{2.99}\text{P}_{1.01}$
13	53.66	0.15	15.65	0.02	30.94	0.04	100.46	$(\text{Fe}_{1.93}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.04})_{2.98}\text{P}_{1.01}$
14	53.77	0.18	15.67	0.02	31.24	0.03	100.89	$(\text{Fe}_{1.92}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.06})_{2.99}\text{P}_{1.01}$
15	53.27	0.15	15.62	0.02	31.56	0.06	100.68	$(\text{Fe}_{1.91}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.08})_{3.00}\text{P}_{1.01}$
16	53.06	0.15	15.71	0.02	31.50	0.04	100.47	$(\text{Fe}_{1.90}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.07})_{2.98}\text{P}_{1.02}$
17	53.71	0.13	15.77	0.01	31.21	0.02	100.85	$(\text{Fe}_{1.92}\text{Ni}_{1.06})_{2.98}\text{P}_{1.02}$
18	53.84	0.13	15.82	0.02	31.19	0.02	101.02	$(\text{Fe}_{1.92}\text{Ni}_{1.06})_{2.98}\text{P}_{1.02}$
19	53.60	0.15	15.72	0.02	31.24	0.08	100.81	$(\text{Fe}_{1.92}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.06})_{2.99}\text{P}_{1.01}$
20	54.05	0.17	15.74	0.02	31.02	0.04	101.04	$(\text{Fe}_{1.93}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.05})_{2.99}\text{P}_{1.01}$
21	54.05	0.16	15.51	0.02	30.64	0.02	100.40	$(\text{Fe}_{1.94}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.05})_{3.00}\text{P}_{1.00}$
22	54.40	0.16	15.47	0.02	30.27	0.04	100.36	$(\text{Fe}_{1.96}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.04})_{3.01}\text{P}_{1.00}$
23	54.14	0.17	15.56	0.01	30.64	0.02	100.54	$(\text{Fe}_{1.94}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.05})_{3.00}\text{P}_{1.01}$
24	53.99	0.17	15.46	0.02	30.53	0.06	100.23	$(\text{Fe}_{1.94}\text{Co}_{0.01}\text{Ni}_{1.05})_{3.00}\text{P}_{1.00}$
<b>Белые (яркие)</b>								
25	41.46	0.12	15.66	0.01	43.44	0.06	100.75	$(\text{Fe}_{1.49}\text{Ni}_{1.49})_{2.98}\text{P}_{1.00}$
26	40.33	0.11	15.57	0.01	44.04	0.05	100.11	$(\text{Fe}_{1.46}\text{Ni}_{1.52})_{2.98}\text{P}_{1.02}$
27	40.37	0.10	15.62	0.01	44.26	0.05	100.41	$(\text{Fe}_{1.46}\text{Ni}_{1.52})_{2.98}\text{P}_{1.02}$
28	36.64	0.09	15.51	0.01	47.89	0.04	100.18	$(\text{Fe}_{1.33}\text{Ni}_{1.65})_{2.98}\text{P}_{1.01}$
29	36.87	0.08	15.58	0.1	47.98	0.07	100.59	$(\text{Fe}_{1.33}\text{Ni}_{1.65})_{2.98}\text{P}_{1.02}$
30	39.85	Не опр.	14.50	Не опр.	44.70	Не опр.	99.10 <sup>1</sup>	$(\text{Fe}_{1.47}\text{Ni}_{1.57})_{3.04}\text{P}_{0.96}$
31	39.84	»	14.57	»	44.95	»	99.44 <sup>2</sup>	$(\text{Fe}_{1.42}\text{Ni}_{1.57})_{2.99}\text{P}_{0.97}$
32	40.37	»	14.52	»	44.02	»	98.94 <sup>3</sup>	$(\text{Fe}_{1.49}\text{Ni}_{1.54})_{3.03}\text{P}_{0.97}$
33	40.17	»	14.65	»	43.60	»	98.47 <sup>4</sup>	$(\text{Fe}_{1.49}\text{Ni}_{1.54})_{3.03}\text{P}_{0.98}$
34	40.91	»	15.10	»	44.11	»	100.17 <sup>5</sup>	$(\text{Fe}_{1.49}\text{Ni}_{1.52})_{3.01}\text{P}_{0.99}$

Примечание. <sup>1</sup> в т.ч. в мас. % — S = 0.02; Ag = 0.03; <sup>2</sup> S = 0.02; Ti = 0.01; Ag = 0.05; <sup>3</sup> S = 0.02; Ag = 0.01; <sup>4</sup> S = 0.03; Ag = 0.02; <sup>5</sup> S = 0.02; Ag = 0.03. Пределы обнаружения, мас. %: Fe – 0.031; Co – 0.035; P – 0.015; Cr – 0.029; Ni – 0.036; Cu – 0.044; Ag – 0.045; S – 0.014. Не опр. — не определялось.

Таким образом, отметим, что в метеорите Чедер присутствуют три типа фосфидов никеля и железа, различающихся по содержанию железа, никеля и кобальта. В полированных шлифах в воздухе под микроскопом фосфиды характеризуются близкой отражательной способностью, сравнимой с отражательной способностью Fe-Ni сплавов. При полировке и распиловке все три типа фосфидов выкрошиваются. Анизотропия (двуотражение) отчетливо наблюдается только в высокожелезистом типе шрейберзита, слагающем, как правило, самые крупные выделения. При кратковременном травлении в парах слабоконцентрированной азотной кислоты все типы фосфидов не травятся. Согласно данным [Clarke, Goldstein, 1978], самым высокотемпературным типом является высокожелезистый шрейберзит, а самым

низкотемпературным типом — никельфосфид (тип 3). Второй тип фосфида по температуре является промежуточным между первым и третьим.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ (ЭПГ) И РЗЭ В МЕТЕОРИТЕ ЧЕДЕР

Известно [Crocket, 1972; Naldrett, Luke, 1980], что в железных метеоритах в довольно значительных количествах присутствуют элементы платиновой группы (ЭПГ), которые находятся, вероятно, в рассеянном виде, образуя механические примеси в металлических фазах. Об этом, в частности, может свидетельствовать количество ЭПГ в железных метеоритах, более чем на порядок превышающее их содержание в каменных метеоритах. Результаты изучения ЭПГ и Re в метеорите Чедер и сравнение со средним значением в 46 железных метеоритах [Crocket, 1972] показали следующие результаты (г/т) (табл. 4).

Таблица 4. Содержания ЭПГ и рения в железных метеоритах и метеорите Чедер (г/т)

Элемент	Пределы $n \cdot 10^{-4}$	Среднее	Наши данные
Ru	0.16—36	7.32	28.3
Pd	1.6—19.7	4.50	2.0
Os	0.009—58	5.36	12.0
Ir	0.009—47	3.96	19.0
Pt	0.5—29	9.42	15.0
Re	0.0023—4.35	0.4166	1.5

Как видно (см. табл. 4), в метеорите Чедер содержание отдельных ЭПГ и рения в несколько раз выше, чем значения в среднем по 46 метеоритам, за исключением палладия. Его количество, напротив, почти в два раза ниже. Отношение количества легкоплавких ЭПГ к тугоплавким в 46 метеоритах составило 0.84 (без родия), а в метеорите Чедер — 0.32. Однако, несмотря на то, что отношение различное, общая тенденция сохраняется — тугоплавкие ЭПГ преобладают.

Распределение ЭПГ в метеорите Чедер в целом имеет ахондритовый вид (рисунок, отличающийся от распределения ЭПГ в хондритовом метеорите C1, по которому проводилось нормирование) и характеризуется двумя максимумами по рутению в группе тугоплавких и по платине в группе легкоплавких элементов. При этом можно видеть (рис. 9), что тугоплавкие ЭПГ имеют практически хондритовое распределение, где содержание от осмия к иридию и рутению лишь незначительно увеличивается, однако общее содержание более чем на порядок превышает количество этих элементов в хондритовом метеорите C1. Сравнивая распределение ЭПГ в метеорите Чедер с таковыми в хромититах, которые являются носителями ЭПГ в земных условиях и во многих случаях служат коренным источником для формирования промышленных россыпей [Волченко, Коротеев, 1990; Агафонов и др., 2005], можно отметить, что в области тугоплавких ЭПГ иногда отмечается близкий рисунок кривых к хондритовому распределению [Волченко, Коротеев, 1990], но с максимумом по иридию. Практически всегда в хромититах, как и в метеорите Чедер, палладий содержится в минимальных количествах. Что же касается общего количества ЭПГ в метеоритах, то оно значительно превышает его содержание в хромититах.

Редкоземельные элементы обычно исследуются либо в каменных метеоритах, либо в силикатной части железокремнистых метеоритов или в отдельных минералах-силикатах [Schmitt et al., 1963]. Работ,

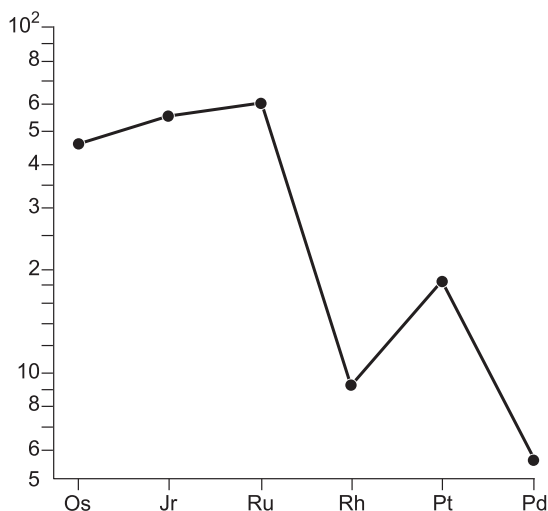


Рис. 9. Распределение элементов платиновой группы в метеорите Чедер.

Нормировано по углистому хондриту C1 [Naldrett, Duke, 1980].

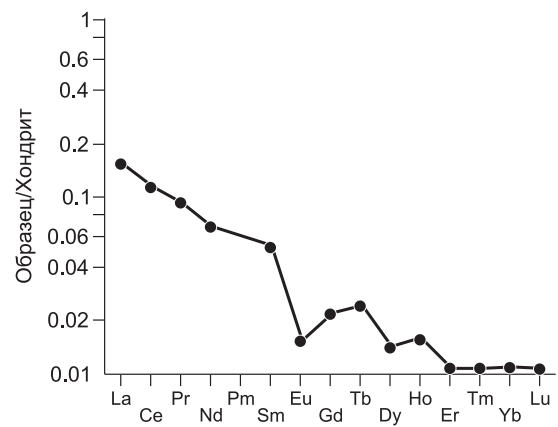


Рис. 10. Распределение РЗЭ в метеорите Чедер.

Нормировано по углистому хондриту C1 [Evensen et al., 1978].

посвященных специальным исследованиям РЗЭ в железных метеоритах, нами не встречено. В цитируемой выше статье приводятся определения отдельных элементов (La, Pr, Sm, Eu, Dy и Ho) в двух железных метеоритах Одесса и Эрос, причем в метеорите Одесса анализировались только Sm, Eu и Ho. Сравнение с содержаниями РЗЭ в метеорите Чедер показывает, что в нем количество редкоземельных элементов почти на два порядка ниже, при этом в составе РЗЭ преобладают легкие элементы. Характер распределения РЗЭ, нормированных по хондриту C1, показывает, что в области легких элементов идет снижение содержания от лантана до эрбия с двумя незначительными минимумами по европию и диспрозию (рис. 10). Пропорции четырех последних РЗЭ соответствуют хондритовым, однако их количество весьма ограничено.

### ПРОДУКТЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ВЫВЕТРИВАНИЯ МЕТЕОРИТА

Выше отмечалось, что с наружной поверхности метеорит покрыт тонкой корочкой различного цвета, от коричневого до почти черного, похожего на пустынный загар. Толщина корочки не превышает 0.2 мм и увеличивается на нижней стороне метеорита, которая соприкасалась с подстилающей поверхностью. При оценке степени изменения метеорита Чедер в гипергенных условиях и во время полета в атмосфере Земли можно отметить, что они минимальны. Так, в атакситовом метеорите Чинге в процессе выветривания образуется относительно мощная кайма лимонита [Агафонов и др., 1997], чему, вероятно, способствовала плесситовая структура метеорита — тонкая смесь тэнита и камасита. В метеорите Чедер плессит фиксируется главным образом внутри балок видманштеттеновых структур, что, вероятно, способствовало сохранности метеорита в поверхностных условиях. Анализ продуктов выветривания метеорита (табл. 5) позволяет разделить их на три разновидности главным образом по количеству воды, косвенно определяемой по дефициту в сумме анализа: 1 — интенсивно лимонитизированный материал с суммой в интервале 84.79—88.57 мас. %; 2 — слаболимонитизированный материал с суммой в интервале 96.25—98.29; 3 — исходное вещество метеорита, не подвергшееся гидратации, с суммой 100.11 и 100.57. Прежде всего следует отметить весьма высокое содержание фосфора в поверхностных продуктах изменения, которое значительно превышает его количество в валовом составе метеорита. Лишь только в одном случае его количество (0.15 мас. %) сравнимо с содержанием в метеорите. Это обстоятельство заставляет предполагать, что обогащение фосфором в тонкой периферийной кайме метеорита происходило при его плавлении в атмосфере Земли при полете. В этом случае фосфор как более подвижный компонент мог обогащать кайму метеорита посредством диффузии на границе горячее—холодное. При плавлении в полете диффузия была направлена внутрь метеорита, а при падении его и закалке — к периферии как более охлажденной части. Поскольку этот процесс наиболее благоприятно происходит при очень высоком градиенте температур, то концентрация фосфора будет фиксироваться в тонкой периферийной пленке, что и фиксируется в данных анализа (см. табл. 5). В анализах с повышенным количеством воды часть железа, очевидно, присутствует в виде Fe<sup>+3</sup>. Исходя из низкого содержания никеля в большинстве продуктов изменения, следует предполагать вынос никеля в условиях гипергенеза. О влиянии атмосферных условий на изменение поверхностной корки метеорита свидетельствует повышенное содержание оксида кремния (0.14—0.28 мас. %) в ряде продуктов изменения. Не исключено, что в образцах с повышенным количеством никеля (см. табл. 5, ан. 5, 8) первоначально присутствовал плессит, из которого в зоне гипергенеза часть железа и никеля была вынесена.

Таблица 5. Химический состав поверхностных продуктов изменения метеорита Чедер, мас. %

Компонент	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	13
FeO	93.43	92.83	88.86	72.61	81.55	84.34	78.87	94.88	93.01	95.25	97.01
MnO	0.17	0.03	0.02	0.01	Не обн.	Не обн.	Не обн.	0.01	0.01	Не обн.	Не обн.
NiO	1.06	5.51	9.42	8.53	5.62	2.90	8.98	0.39	1.27	0.54	0.64
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.05	0.08	0.11	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05
MgO	0.03	0.04	0.06	0.13	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02
SiO <sub>2</sub>	0.04	0.02	0.12	0.28	0.42	0.15	0.14	0.02	0.01	0.03	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.74	1.62	1.48	2.32	0.37	0.15	0.41	0.96	1.88	0.54	0.54
K <sub>2</sub> O	Не обн.	Не обн.	0.03	0.07	Не обн.	Не обн.	0.03	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.
CaO	0.04	0.01	0.50	0.73	0.06	0.04	0.06	»	0.01	»	»
Сумма	96.57	100.11	100.57	84.79	88.09	87.65	88.57	96.32	96.25	96.43	98.29

Примечание. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub> — не обнаружены. 1—13 — номера точек анализа.

Вторая разновидность продуктов изменения метеорита характеризуется меньшей степенью гидратированности и минимальными содержаниями никеля, очевидно, вынесенным из метеорита на локальных микроучастках, вследствие чего произошло незначительное обогащение железом.

Третий тип вторичных изменений представлен не содержащими воду соединениями, вероятно, представляющими продукты плавления метеорита в маломощной поверхностной корочке метеорита. Состав их практически не отличается от валового состава метеорита за исключением фосфора, количество которого, как и в двух первых типах, также повышено. Гипергенное влияние на продукты плавления проявилось в виде обогащения кальцием и магнием, которое фиксируется в одном из анализов.

Хорошая сохранность метеорита в условиях земной поверхности прежде всего обусловлена благоприятными гидрогеологическими условиями. Во-первых, падение в песчаные отложения способствовало его механической сохранности при ударе и в дальнейшем в результате ветровой эрозии песков его быстрому выведению на дневную поверхность. Во-вторых, залежание на поверхности песков исключало длительный контакт метеорита с близповерхностными водами. В-третьих, для его сохранности большое значение имел пустынный загар, в условиях которого проявлялось лишь золотое выветривание, не приводящее к глубоким физико-химическим изменениям. Уплотненная сторона, на которой лежал метеорит, несет следы более интенсивных изменений в виде образования корки лимонита с включениями песчинок из подстилающих песков.

### ВЫВОДЫ

Метеорит Чедер имеет железо-никелевый состав с примесью кобальта и фосфора, и сложен преобладающим по объему камаситом, тэнитом и резко подчиненным им фосфидом никеля и железа. Все минералы характеризуются переменным составом, обусловленным колебаниями взаимозамещающих железа и никеля. Из элементов-примесей в наибольших количествах в минералах присутствует кобальт. Медь фиксируется в Fe-Ni сплавах и фосфидах в ограниченных содержаниях, показывая положительную связь с никелем и отрицательную с кобальтом и находится в основном в тэните. Фосфиды никеля разделились по содержанию никеля и железа на три не перекрывающиеся по составу группы. Наиболее обогащенная никелем разность представлена никельфосфидом, мелкие выделения которого в специальной литературе носят название — рабдит. Структура метеорита, исходя из ширины балок и его химического состава, отвечает среднеструктурному октаэдриту (Om) химической группы IID. Метеорит характеризуется аномально высокими содержаниями Ga и Ge.

Замер ширины балок, сложенных камаситом и тэнитом как в виде индивидуализированных фаз, так и в виде их смеси, показывает, что они характеризуются переменным размером с бимодальным распределением, свидетельствуя о двух периодах в термальной истории метеорита. Первый и наиболее продолжительный период был связан с медленным охлаждением и протекал со скоростью  $1^{\circ}\text{C}/10^6$  лет; второй и кратковременный период обусловлен разрушением этого тела, в результате которого проходило более быстрое остывание со скоростью  $5.36^{\circ}\text{C}/10^6$  лет.

Внутренняя структура метеорита Чедер обусловлена преобладанием камаситовой массы, внутри которой располагаются пересекающиеся под углами кратными  $60^{\circ}$  балки сложного камасит-тэнит-плекситового состава с тэнитовой каймой. Внутри камаситовой матрицы фиксируются вторичные эмбриональные линзовидные образования менее никелистого камасита, окруженного тэнитовой каймой. Вероятно, их формирование связано с повторным шоковым прогревом метеорита.

Распределение ЭПГ в метеорите в целом имеет хондритовый вид, а в области тугоплавких элементов близко к хондритовому. Общее содержание ЭПГ в метеорите Чедер в несколько раз превышает количество платиноидов в хромититах, представляющих один из носителей ЭПГ в земных условиях. Распределение РЗЭ характеризуется обогащением легкими элементами с двумя минимумами по европию и диспрозию. Общее содержание РЗЭ в метеорите почти на два порядка меньше, чем в хондрите С1.

Метеорит хорошо сохранился из-за благоприятной геолого-гидрологической обстановки. Его поверхность в отдельных местах покрыта тонкой корочкой плавления, обогащенной фосфором и частично покрытой пустынным загаром. Участками поверхность метеорита незначительно лимонитизированна.

Работа выполнена при поддержке РФФИ — грант 09-05-01130.

### ЛИТЕРАТУРА

Агафонов Л.В., Кужугет К.С., Ойдул Ч.К., Иванова Г.М. Минеральный состав метеорита «Чинге» // Докл. РАН, 1997, т. 352, № 4, с. 501—503.

Агафонов Л.В., Лхамсурэн Ж., Кужугет К.С., Ойдул Ч.К. Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы. Улаанбаатар, «Оюны зууч», 2005, 224 с.

**Бритвин С.Н., Коломенский В.Д., Болдырева М.Н., Богданова А.Н., Крецер Ю.Л., Болдырева О.Н., Рудашевский Н.С.** Никельфосфид  $(\text{Ni,Fe})_3\text{P}$ -никелевый аналог шрейберзита // Зап. ВМО, 4. СХХVIII, № 3, 1999, с. 64—72.

**Волченко Ю.А., Коротеев В.А.** Типы распределения платиноидов в альпинотипных комплексах складчатых поясов // Геохимия рудных элементов в базитах и гипербазитах. Критерии прогноза. Иркутск, 1990, с. 17—21.

**Додд Р.Т.** Метеориты. М., Мир, 1986, 384 с.

**Дьяконова М.Н., Харитонова В.Я., Явнель А.А.** Химический состав метеоритов. М., Наука, 1979, 68 с.

**Попов В.А., Кудрявцев В.И., Забелин В.И., Агафонов Л.В.** О новой находке метеорита в Туве // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии /Ред. В.И. Лебедев. Кызыл, ТувИКОПР СО РАН, 2004, с. 112—113.

**Родионов Д.А.** Функции распределения содержания элементов и минералов в изверженных породах. М., Наука, 1964, 102 с.

**Соботович Э.В., Семененко В.П.** Вещество метеоритов. Киев, Наук. думка, 1984, 192 с.

**Clarke R.S., Jr., Goldstein J.I.** Schreibersite growth and its influence on the metallography of coarse-structured iron meteorites. *Smithson. Contr. Earth Sci.* 1978, v. 21, 80 p.

**Crocket J.H.** Some aspects of the geochemistry of Ru, Os, Ir and Pt in iron meteorites // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1972, v. 36, № 5, p. 517—535.

**Evensen N.M., Hamilton P.J., O'Nions R.K.** Rare earth abundances in chondritic meteorites // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1978, v. 42, № 8, p. 1199—1213.

**Goldstein J.I., Short J.M.** The iron meteorites, their thermal history and parental bodies // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1967, v. 31, № 10, p. 1733—1770.

**Naldrett A.J., Duke J.M.** Platinum metals in magmatic sulfide ores // *Science*, 1980, v. 208, № 4451, p. 1417—1424.

**Owen E.A., Liu T.H.** Further X-ray study of the equilibrium diagram of the iron-nickel system — I // *Iron Steel Inst.*, 1949, v. 163, p. 132—137.

**Schmitt R.A., Smith R.H., Lasch J.E., Mosen A.W., Olehy D.A., Vasilevskis J.** Abundances of the fourteen rare-earth elements, scandium and yttrium in meteoritic and terrestrial matter. // *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1963, v. 27, № 6, p. 577—622.

**Short J.M., Goldstein J.I.** Rapid methods of determining cooling rates of iron and stony iron meteorites // *Science*, 1967, v. 156, № 3771, p. 59—61.

*Рекомендована к печати 7 октября 2010 г.  
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию  
30 июня 2010 г.*