

УДК 549.3 : 523.681.8

**Е.П. Гуров, В.В. Пермяков**

Институт геологических наук НАН Украины  
01601, г. Киев, Украина, ул. О. Гончара, 55-б  
E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com

## СУЛЬФИДЫ В УДАРНО-РАСПЛАВЛЕННЫХ ПОРОДАХ БОЛТЫШСКОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУКТУРЫ

Проведено электронно-микроскопическое изучение акцессорной сульфидной минерализации в составе ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры на Украинском щите. Наиболее распространенный сульфид — гексагональный пирротин, образующий сферулы и таблитчатые кристаллиты размером до 30 мкм в стекловатой матрице расплавных импактитов. В то время как преобладающая часть сферул по составу соответствует высокотемпературному пирротину  $Fe_{0,88}S_{1,00}$ , в них содержатся участки неправильной формы с повышенным содержанием никеля и меди. Отдельные точечные анализы сферул указывают на наличие в минерале некоторых элементов платиновой группы (ЭПГ) в количестве до десятых процента. Сканирование зерен пирротина по разрезам показывает их обогащение ЭПГ в два–четыре раза по сравнению с вмещающей матрицей. Сфалерит в расплавных импактитах образует единичные зерна неправильной формы с содержанием железа до 5 мас. %. В составе сфалерита установлено содержание ЭПГ, в несколько раз превышающее их содержание в матрице. Точечный микрозондовый анализ позволил установить присутствие отдельных ЭПГ в минерале (до 0,1n мас. %). Проведенные исследования подтверждают роль сульфидов в составе ударно-расплавленных пород как концентраторов никеля и ЭПГ, вероятным источником которых было вещество ударника, образовавшего Болтышскую импактную структуру.

*Ключевые слова:* импактная структура, ударно-расплавленная порода, акцессорий, сульфид, пирротин, никель, платиноид.

**Введение.** Определение природы и состава кратерообразующих тел — важнейшее направление в изучении закономерностей ударного кратерообразования на поверхности Земли. Геохимические методы исследования пород импактных структур позволяют получить информацию о составе некоторых элементов, являющихся реликтами переработанного вещества образовавших их ударников, при этом наиболее информативными оказываются элементы платиновой группы (ЭПГ), а также некоторые сидерофильные элементы (никель и кобальт) и хром [14, 22, 23]. В то же время минералогические методы исследования расплавных импактитов позволяют установить минералы-концентраторы ряда элементов, источником которых послужило вещество кратерообразующих тел. Исследования акцессорных и рудных минералов некоторых импакт-

ных структур, в том числе Мороквенг, Лап-паярви, Нордлингер Рис и других кратеров показали, что главные концентраторы ЭПГ и никеля в составе ударно-расплавленных пород — это сульфиды [8, 25 и др.]. С помощью методов электронной микроскопии нами впервые проведено изучение акцессорных минералов в составе ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры.

**Болтышская импактная структура** диаметром 24 км расположена в центральной части Украинского щита в бассейне реки Тясмин, правого притока реки Днепр. Особый интерес к всестороннему изучению этой структуры возник после установления возраста ее образования —  $65,17 \pm 0,64$  млн лет назад на мел-палеогеновом рубеже [18, 19], т. е. практически одновременно с образованием кратера Чиксулуб ( $65,46 \pm 0,6$  млн лет), определившим катастрофические события мел-палеогенового рубежа [9, 21, 24].

© Е.П. ГУРОВ, В.В. ПЕРМЯКОВ, 2014

Расплавные импактиты в Болтышском кратере образуют кольцеобразную залежь вокруг центрального поднятия, внешний диаметр которой составляет около 12 км, мощность достигает 211 м. Согласно результатам петрографических исследований [2, 4, 5, 15], в составе толщи расплавных импактитов выделяются два горизонта пород.

Нижний горизонт мощностью до 140 м представлен породами, состоящими из микролитов полевых шпатов и ромбического пироксена в стекловатой матрице, причем структура матрицы изменяется от чистого гомогенного стекла до девитрифицированного стекла с трихитами пироксена. Микролиты плагиоклаза представлены слабозональным андезинлабрадором. Поздние скелетные кристаллиты полевого шпата представлены барийсодержащим санидином с содержанием около 30 % альбитовой и 2 — цельзиановой молекул. Микролиты ромбического пироксена представлены слабозональным гиперстеном, в то время как поздние скелетные выделения минерала представлены феррогиперстеном [4].

Верхний горизонт ударно-расплавленных пород мощностью до 80 м состоит из полнокристаллических пород с микролитами полевых шпатов и замещенного хлоритом пироксена. Состав полевых шпатов в этом типе пород близок к их составу в породах нижнего горизонта со стекловатой матрицей. Матрица представлена криптокристаллическими кварц-полевошпатовыми агрегатами с микрогранофировыми структурами и не содержит стекла.

В результате проведения геохимических исследований ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры в их составе установлено присутствие низкой концентрации некоторых ЭПГ, а также кобальта, никеля и хрома, причем для двух последних определено десяти-двадцатикратное повышение их содержания в расплавных импактатах по сравнению с содержанием в гранитоидах мишени [1, 3, 15, 16, 20].

При электронно-микроскопическом изучении ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры в их составе выявлен комплекс акцессорных минералов, в том числе самородных металлов (платины, меди, золота, серебра), оксидов железа и титана, сульфидов и фосфатов [17]. С целью поисков следов вещества ударника произведено электронно-микроскопическое изучение состава акцессор-

ных и рудных минералов из расплавных импактитов кратера, причем основное внимание уделено изучению сульфидов как основных концентраторов платиноидов, никеля и некоторых других элементов.

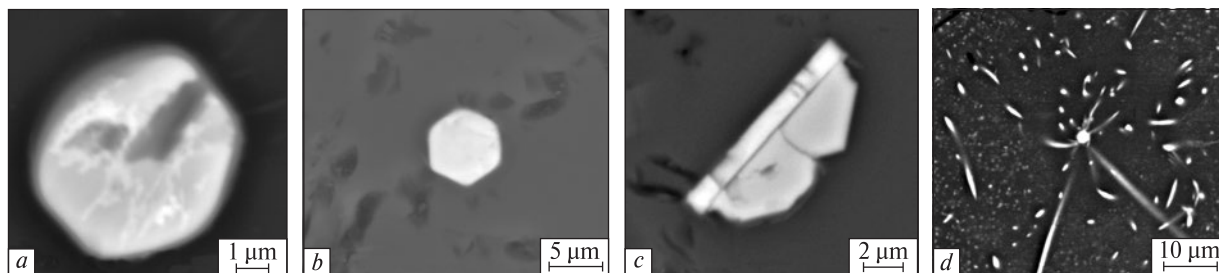
**Образцы и методы исследования.** Для электронно-микроскопических исследований были отобраны образцы керна двух скважин, вскрывших толщу ударно-расплавленных пород на полную мощность: 211 м в скв. № 11475 и 141 — в скв. № 50 [2, 3, 16].

Ударно-расплавленные породы со свежей стекловатой матрицей были представлены тремя образцами, в том числе из скв. 11475, инт. 775 и 778 м и из скв. 50, инт. 667 м, породы с девитрифицированной стекловатой матрицей были представлены образцами из скв. 11475, инт. 694 и 761 м и из скв. 50, инт. 734 м. Из верхнего интервала микрокристаллических пород для анализа были использованы образцы из скв. 11475, инт. 603 м и скв. 50, инт. 598, 605 и 650 м.

Микрозондовые исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе *JEOL JSM-6490LV* с установленными на нем энерго- (*EDS*) и волнодисперсионным (*WDS*) спектрометрами, работающими совместно на базе программной платформы *Energy+* с чувствительностью от 0,001 мас. %. Изучение состава образцов проведено в режиме точечного микроанализа исследуемой зоны диаметром 1—3 мкм, сканирования вдоль заданной линии, а также рентгеновского картирования исследуемого объекта по площади.

**Сульфиды в ударно-расплавленных породах Болтышской структуры.** Акцессорная сульфидная минерализация в составе расплавных импактитов представлена пирротином и его никель- и медьсодержащими разновидностями, а также пиритом и сфалеритом. Недостаточно изучены единичные выделения галенита, халькопирита и акантита, размеры зерен которых составляли 1—3 мкм.

*Пирротин* — один из наиболее распространенных акцессорных минералов в составе ударно-расплавленных пород нижнего горизонта. В то же время этот минерал отсутствует в составе микрокристаллических пород верхнего горизонта толщи расплавных импактитов Болтышской структуры. В породах нижнего горизонта выделения пирротина заключены в стекловатой матрице и не образуют сростков с микролитами пироксена и полевых шпатов.



**Рис. 1.** Формы выделения аксессуарного пирротина в ударно-расплавленных породах Болтышской структуры: *a* — сферула пирротина в стекловатой матрице (светлые участки сферулы маркируют зоны пирротина с содержанием меди до 8,44 мас. %, светлоокрашенное пятно в нижней правой части сферулы характеризуется содержанием платины 4,03 и меди 2,68 мас. % (скв. 11475, инт. 761 м); *b* — гексагональный кристаллит пирротина в стекловатой матрице (скв. 11475, инт. 761 м); *c* — сросток таблитчатого выделения пирротина (светлый вверху слева) с кристаллитом гематита (скв. 11475, инт. 761 м); *d* — сферула пирротина, окруженная "лучами" трихитов пироксена (скв. 11475, инт. 694 м)

**Fig. 1.** Forms of separation of accessory pyrrhotite in impact melt rocks of the Boltsh structure: *a* — spherule of pyrrhotite in glassy matrix (the content of copper in light areas of pyrrhotite reaches up to 8.44 wt. %, the light spot in a lower right part of spherule contains 4.03 wt. % of platinum and 2.68 wt. % of copper (borehole No. 11475, int. 761 m); *b* — hexagonal crystallite of pyrrhotite in glassy matrix; *c* — aggregate of tabular crystallite of pyrrhotite (light upper left) with hematite (borehole 11475, int. 761 m); *d* — spherule of pyrrhotite surrounded by the "rays" of pyroxene trichites (borehole 11475, int. 694 m)

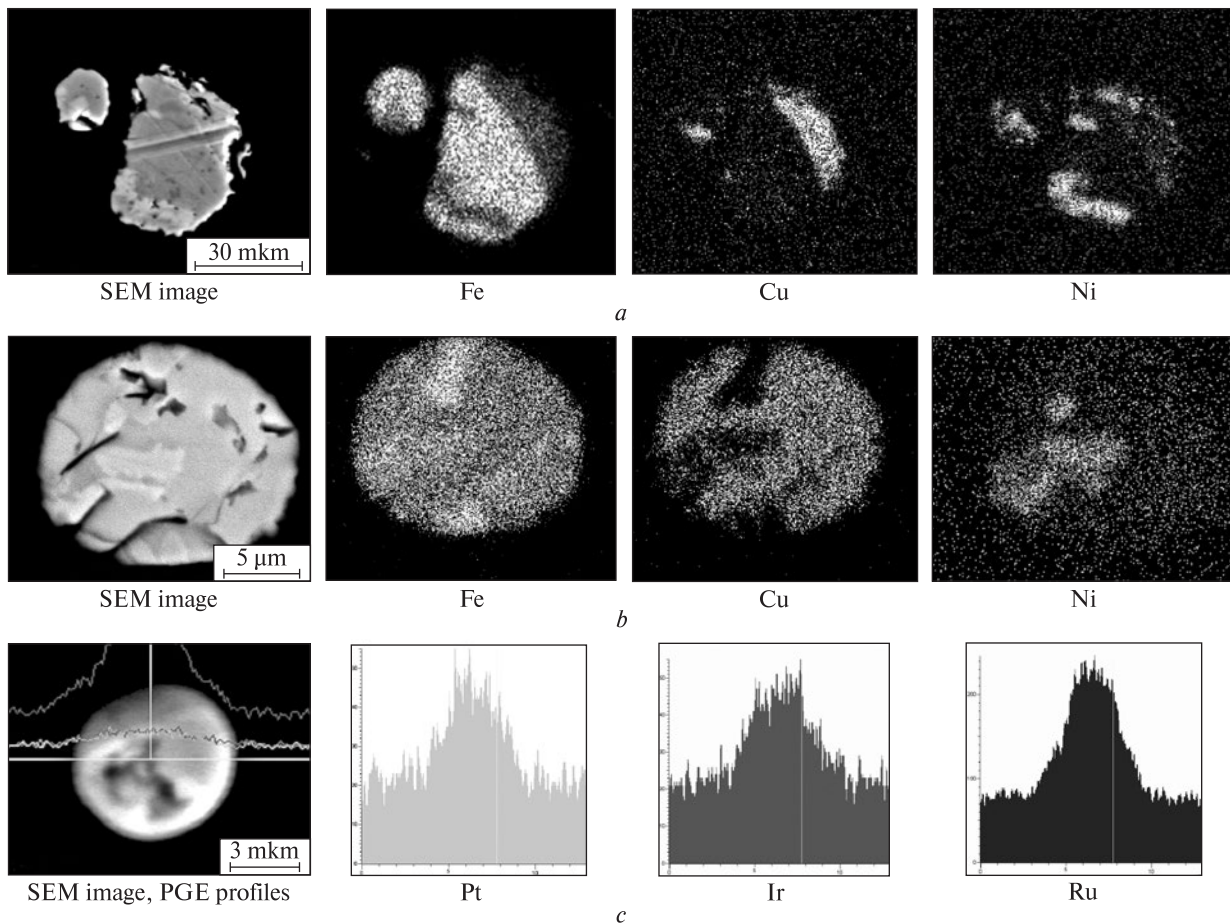
Наиболее часто минерал представлен в виде сферул размером от 5 до 25 мкм (рис. 1, *a*, 2, *a*–*c*). Реже наблюдаются гексагональные толстотаблитчатые кристаллиты диаметром от 2 до 10 мкм (рис. 1, *b*). Характерны сростания

таблитчатых выделений пирротина с алюминийсодержащим гематитом (рис. 1, *c*). В стекловатой матрице вокруг сферул пирротина часто наблюдаются ореолы радиально расположенных прямолинейных и изогнутых трихи-

**Таблица 1.** Состав пирротина и его никель- и медьсодержащих разновидностей из ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры

**Table 1.** Composition of pyrrhotite and its nickel- and copper-bearing varieties from impact melt rocks of the Boltsh impact structure

Номер скважины	114	11475	11475	11475	11475	11475	11475	11475	50	50	11475	11475
Интервал, м	761	667	761	761	761	761	761	694	664	664	667	694
Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fe	59,58	60,48	60,51	60,08	57,91	54,75	47,29	30,40	49,32	42,61	37,03	33,63
Ni	—	—	0,06	—	0,26	0,08	1,06	1,51	12,30	19,74	23,59	30,70
Co	—	—	0,08	—	0,06	0,06	0,25	—	—	—	—	—
Cu	—	—	—	—	3,73	6,34	13,82	30,90	—	—	1,33	—
Ir	—	—	—	0,28	—	—	—	—	—	—	—	—
Rh	—	—	—	—	—	0,06	—	—	—	—	—	—
Pt	—	—	—	0,13	—	—	—	—	—	—	—	—
Pd	0,05	—	—	0,03	—	—	—	—	—	—	—	—
Au	—	—	—	—	—	—	0,20	—	—	—	—	—
S	38,77	40,32	37,34	40,46	37,94	39,04	35,42	36,06	37,43	37,20	36,78	35,82
Si	0,46	0,29	0,80	0,62	0,39	0,49	0,66	1,35	—	0,31	0,85	0,53
Сумма	98,86	101,09	98,79	101,57	100,29	100,82	103,00	100,22	99,05	99,86	99,58	100,68
<i>Количество катионов в пересчете на 1 атом серы; анализ 12 пересчитан на 8 атомов серы</i>												
Fe	0,88	0,86	0,93	0,85	0,88	0,81	0,77	0,48	0,75	0,66	0,58	4,31
Ni	—	—	—	—	—	—	—	0,02	0,18	0,29	0,35	3,74
Cu	—	—	—	—	0,05	0,08	0,20	0,42	—	—	0,02	—



*Рис. 2.* Состав и строение сферул пирротина в ударно-расплавленных породах: *a, b* — электронные снимки и поэлементные карты железа, никеля и меди сферул пирротина в стекловатой матрице, части сферул с высоким содержанием никеля на электронных изображениях наблюдаются в виде более светлых участков неправильной формы, участки сферул с повышенным содержанием меди слабо выражены на изображениях; *c* — профили электронного сканирования сферулы пирротина. В составе сферулы наблюдается повышение содержания некоторых ЭПГ по отношению к их содержанию в стекловатой матрице (все образцы из скв. 11475, инт. 761 м)

*Fig. 2.* Composition and structure of pyrrhotite spherules in impact melt rocks: *a, b* — SEM images and maps of nickel and copper of pyrrhotite spherules in glassy matrix, light areas at SEM images determine their parts enriched in nickel, areas with high content of copper are weakly distinguished from pyrrhotite with low content of admixtures; *c* — SEM image and electron scanning profile of pyrrhotite spherule in glassy matrix. The composition of pyrrhotite is enriched in the PGE several times relatively to their content in glass (all samples are from borehole 11475, int. 761 m)

тов ортопироксена, предварительно диагностированного как эвлит (рис. 1, *d*). Так как трихиты являются последней кристаллической фазой, выделившейся до застывания остаточного расплава в виде стекла, такое пространственное взаимоотношение трихитов и пирротина свидетельствует о выделении последнего из жидкой фазы на позднем этапе ее застывания, но ранее выделения из нее трихитов.

Микронзондовый анализ сферул и кристаллитов пирротина показал, что их состав соответствует формуле  $Fe_{0,88}S_{1,00}$  (табл. 1, обр. 1, 2). Такой состав и гексагональная форма кристаллитов минерала доказывают его принадлеж-

ность к высокотемпературному пирротину [6, 8, 10]. Анализ выделений пирротина позволил установить их неоднородный состав и присутствие в нем примесей меди и никеля. Кроме того, точечный анализ некоторых зерен пирротина показал присутствие в его составе микропримесей ЭПГ, а также кобальта.

Содержание меди в большинстве проанализированных образцов пирротина обычно не превышает 0,1 мас. %. Однако в составе некоторых выделений пирротина установлены участки с повышенным и непостоянным содержанием меди — до 20 мас. % и выше при максимальном установленном ее содержании —

30,40 (табл. 1, обр. 8). Электронные карты сферул позволяют установить характер распределения примеси меди в минерале (рис. 2, *a, b*). Состав некоторых участков пирротина с повышенным содержанием меди рассчитывается на формулы  $(\text{Fe}_{0,88}\text{Cu}_{0,05})_{0,93}\text{S}_{1,00}$ ,  $(\text{Fe}_{0,81} \times \text{Cu}_{0,08})_{0,89}\text{S}_{1,00}$ ,  $(\text{Fe}_{0,77}\text{Cu}_{0,20})_{0,97}\text{S}_{1,00}$  и др. (табл. 1, обр. 5—7). В составе одной сферулы пирротина изучен участок с высоким содержанием меди, по составу приближающийся к валле-рииту [6] и рассчитываемый на формулу  $(\text{Fe}_{4,01}\text{Cu}_{2,67})_{6,68}\text{S}_{7,00}$ .

Неоднородный состав выделений пирротина наблюдается на электронно-микроскопических снимках его сферул. На фоне светло-серого тона большей части поверхности среза сферул и кристаллитов наблюдаются более светлоокрашенные незакономерно расположенные участки неправильной формы размером до первых микрометров, характеризующиеся повышенным содержанием никеля (рис. 2, *a, b*). Форма обогащенных никелем участков пирротина четко видна на электронных картах его выделений. Содержание никеля колеблется в значительных пределах и в единичных случаях достигает 20 мас. % и более (табл. 1, обр. 9—12). Состав некоторых обогащенных никелем участков пирротина соответствует формулам  $(\text{Fe}_{0,88}\text{Ni}_{0,06}\text{Cu}_{0,01})_{0,95}\text{S}_{1,00}$  —  $(\text{Fe}_{0,58}\text{Ni}_{0,35} \times \text{Cu}_{0,02})_{0,95}\text{S}_{1,00}$ . Состав светлого участка сферулы пирротина с наиболее высоким содержанием никеля (30,70 мас. %), близок к

пентландиту и соответствует формуле  $(\text{Ni}_{3,74} \times \text{Fe}_{4,31})_{8,05}\text{S}_{8,00}$  (табл. 1, обр. 12). Характер распределения обогащенных никелем участков и их границ с вмещающим пирротинном свидетельствует о том, что во всех изученных случаях главная фаза сульфидных сферул — пирротин. Содержание кобальта в пирротине достигает сотых—десятых долей процента.

Ранее медь- и никельсодержащие разности пирротина были описаны в составе ударно-расплавленных пород некоторых импактных структур. Пирротин с содержанием никеля до 0,2—0,3 мас. % описан в кратерах Босумтви и Рис [11—13]. Высокое содержание никеля до 25,5—31,0 и меди до 26,0 мас. % было зафиксировано в составе пирротина и железо-медно-никелевого сульфида из импактных стекол в зювитах кратера Рис [26]. Медь- и никельсодержащие сульфиды были описаны в ударно-расплавленных породах норитового состава в импактной структуре Мороквенг, в которых установлено высокое содержание примеси метеоритного вещества ударника [7].

В составе ударно-расплавленных пород ряда импактных структур установлено, что содержащиеся в них сульфиды, в первую очередь пирротин, служат главными концентраторами ЭПГ из состава кратерообразующего тела [25]. В результате проведенных исследований пирротина из расплавных импактитов Болтышской структуры в их составе определено присутствие ЭПГ. По данным точечного микронзондового анализа выделений пирротина, в некоторых случаях в его составе установлены ЭПГ, в том числе платина, рутений, иридий, палладий, а также золото в количестве от 0,01н до 0,1н мас. % (табл. 1). В сферуле пирротина диаметром 7 мкм в составе светлого участка диаметром 2 мкм установлено содержание платины 4,03 мас. % (рис. 1, *a*).

Определение содержания ЭПГ в некоторых сферулах пирротина по сетке из четырех—девяти точек только в составе отдельных участков позволило установить присутствие некоторых платиноидов без видимых закономерностей их расположения. Например, в сферуле пирротина диаметром 15 мкм в результате анализа по девяти точкам установлено содержание платины в трех точках, составляющее, соответственно, 0,05, 0,7 и 0,08 мас. %, содержание иридия в одной точке — 0,27, палладия в трех точках — 0,04, 0,04 и 0,10, рутения в одной точке — 0,12 и золота в одной точке —

Таблица 2. Состав пирита из ударно-расплавленных пород и зювитов Болтышской структуры

Table 2. Composition of pyrite from impact melt rocks and suevites of the Boltys structure

Номер скважины	50	50	42	42
Глубина, м	605	605	596	596
Номер образца	7	11	2	12
Fe	45,51	46,51	46,65	46,81
Ni	0,08	0,15	—	—
Co	0,07	0,21	0,03	0,03
Cr	—	—	—	0,02
Pd	—	—	0,06	—
Pt	—	0,07	—	—
Au	0,13	—	0,21	0,07
S	55,49	51,36	53,67	53,21
Сумма	101,28	98,30	100,62	100,14
S : Fe	2,12 : 1,0	2,0 : 1,0	2,0 : 1,0	1,99 : 1,0

0,22 мас. %. В то же время при электронном сканировании сферул по профилям в них постоянно наблюдается повышение в два–четыре раза содержания ряда ЭПГ по отношению к их содержанию в окружающей матрице (рис. 2, с).

*Пирит* в составе ударно-расплавленных пород Болтышской структуры распространен ограниченно. В отличие от пирротина, выделившегося из ударного расплава на поздней стадии его застывания, образование пирита в виде тонких прожилков и друзоподобных образований на стенках трещин ударных пород свидетельствует о его выделении при поздних автогидротермальных процессах, происходящих при остывании их залежи.

Уп্লощенные выделения пирита распространены на стенках трещин в микрокристаллическом расплавленном импактите (скв. 50, инт. 605 м). Пирит представлен уп্লощенными микрокристаллическими агрегатами диаметром до 1–2 мм и толщиной менее 0,5 мм. Состав пирита соответствует теоретическому с отношением атомных количеств серы и железа, равным 2,0 : 1,0 — 2,1 : 1,0 (табл. 2). Элементы-примеси представлены никелем и кобальтом в количестве сотых–десятых долей процента. В

Таблица 3. Состав сфалерита из ударно-расплавленных пород Болтышской структуры, мас. %

Table 3. Composition of sphalerite from impact melt rocks of the Boltysk structure, wt. %

Номер скважины	50	11475	50	50
Глубина, м	650	694	603	603
Номер образца	35	12	2	2–5
Zn	65,65	62,28	60,35	58,87
Fe	—	3,19	4,38	5,29
Cr	Не опр.	Не опр.	0,04	0,03
Ni	" "	" "	—	—
Co	" "	" "	0,02	—
Cu	" "	" "	0,09	0,11
Rh	" "	" "	—	0,05
Pd	" "	" "	0,06	—
Ir	" "	" "	—	0,07
Pt	" "	" "	—	—
Au	" "	" "	—	—
S	34,10	33,92	35,33	35,18
Сумма	99,75	99,39	100,27	99,60
<i>Количество катионов в пересчете на 1 атом серы</i>				
Zn	0,94	0,90	0,84	0,81
Fe	—	0,05	0,07	0,08

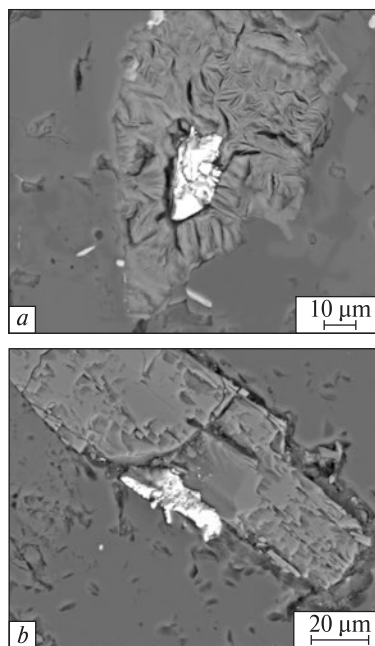


Рис. 3. Выделения сфалерита в ударно-расплавленных породах Болтышской структуры: а — сегрегация сфалерита в хлорите из верхнего горизонта толщи расплавленных импактитов (скв. 50, инт. 650 м); б — выделение сфалерита на контакте микролита гиперстена и стекловатой матрицы из нижнего горизонта толщи импактитов (скв. 11475, инт. 775 м)

Fig. 3. Segregations of sphalerite in impact melt rocks of the Boltysk structure; a — sphalerite grain in chlorite from the upper horizon of the melt sheet (borehole 50, int. 650 m); b — sphalerite segregation at the contact of hyperstene microlite and glassy matrix (borehole No 11475, int. 775 m)

составе некоторых выделений пирита установлено содержание золота до 0,13 мас. % и платины — 0,07. На электронных картах сегрегации пирита наблюдается присутствие в нем кобальта и рутения, однако содержание этих элементов ниже предела их количественного определения.

Ветвящиеся прожилки пирита мощностью до 0,5 мм и его скопления неправильной формы установлены в окварцованных зювитах вблизи их контакта с подстилающими ударно-расплавленными породами (скв. № 42, инт. 596 м). Часто пирит образует сферолитоподобные округлые выделения сложного строения диаметром до 200 мкм, в которых их центральные зоны диаметром до 100–150 мкм состоят из тонкозернистых агрегатов пирита и апатита, окруженных мономинеральными оболочками пирита толщиной 20–30 мкм. Состав пирита из периферических частей его выделений соответствует теоретическому (табл. 2). В составе минерала постоянно содержится при-

мель кобальта — от 0,03 до 0,09 мас. %, изредка установлено содержание золота до 0,21 и хрома до 0,07 мас. %. Состав пирита из центральных апатит-пиритовых участков сферолитоподобных агрегатов характеризуется относительно повышенным содержанием серы с отношением атомных количеств серы и железа, равным 2,1 : 1,0.

*Сфалерит* образует редкие выделения в составе микрокристаллических пород верхнего горизонта толщи расплавных импактитов Болтышской структуры, а также изредка наблюдается в породах нижнего горизонта. Минерал представлен в виде отдельных зерен и агрегатов неправильной формы размером до 30 мкм, которые в породах верхнего горизонта наиболее часто располагаются на контакте матрицы и замещенных хлоритом микролитов пироксена либо внутри хлоритовых сегрегаций (рис. 3, а). Выделения сфалерита в породах нижнего горизонта ударно-расплавленных пород наиболее часто располагаются на контактах микролитов пироксена и матрицы (рис. 3, б). Форма выделения зерен и агрегатов сфалерита свидетельствует о позднем его образовании, в том числе в пределах верхнего горизонта ударно-расплавленных пород одновременно с процессом хлоритизации пироксена.

Изучение состава сфалерита показывает, что наиболее распространенная примесь в нем — железо, содержание которого составляет около 4—5 мас. % (табл. 3), что соответствует содержанию пирротиновой молекулы около 8—10 мас. %. Согласно данным [6, 8], такое содержание железа в минерале свидетельствует о температуре его образования около 300—400 °С при охлаждении толщи ударно-расплавленных пород. Примесь меди в составе сфалерита составляет 0,1 мас. %, кобальт и хром в минерале содержатся в количестве сотых долей процента. Точечный микрозондовый анализ отдельных участков зерен позволил установить содержание в них иридия, палладия и родия в количестве сотых долей процента, платина, осмий и золото не установлены. С помощью электронного сканирования кристаллитов сфалерита по разрезам определено относительное обогащение минерала ЭПГ по сравнению с матрицей, в том числе в два—три раза — рутением и палладием. В связи с кристаллизацией сфалерита на поздних этапах охлаждения толщи ударно-расплавленных пород особенности его состава свидетельствуют

о сложной истории миграции и концентрации ЭПГ в составе ударных расплавов от их накопления в составе пирротина, выделившегося до затвердевания стекловатой матрицы, до концентрации в составе поздних сульфидов на стадии автогидротермальной переработки расплавных импактитов после полного затвердевания их толщи.

В составе образца расплавного импактита со стекловатой матрицей (скв. 11475, инт. 761 м) диагностированы единичные зерна сульфида серебра, близкого к *акантиту*. Зерна имеют неправильную форму, их размер от 1,5 до 2,5 мкм. Содержание серебра составляет 75,90—77,49 мас. %, меди — до 1,77 и серы — 13,66—14,08. Отношение атомных количеств серебра и серы колеблется от 1,65 : 1 до 1,76 : 1, что свидетельствует о дефиците серебра относительно теоретического состава *акантита*. Наличие примесей, мас. %: силиция — 2,98, алюминия — до 0,78, кислорода — до 5,79 связано, вероятно, с влиянием состава матрицы на результаты анализа минерала.

**Выводы.** Впервые проведено изучение акцессорных минералов в составе ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры. В составе расплавных импактитов со стекловатой матрицей, составляющих преобладающую по мощности нижнюю часть их толщи, наиболее распространенным сульфидом является пирротин, выделившийся из ударного расплава на поздней стадии его застывания. Особенность состава пирротина — примесь в нем никеля и меди, образующих в минерале обогащенные участки. Определение примеси ЭПГ в пирротине позволило установить в составе отдельных участков его выделений содержание платины, иридия, рутения и палладия в количестве до десятых долей процента. Сканирование разрезов сферул пирротина и окружающего их стекла показало постоянное обогащение минерала ЭПГ в два—четыре раза по отношению к вмещающей матрице.

Сфалерит в составе ударно-расплавленных пород — это поздний минерал, выделившийся после застывания расплава в ходе автогидротермальных процессов. При проведении точечного микрозондового анализа в составе отдельных точек выделений сфалерита установлено содержание ЭПГ в количестве до 0,1 мас. %.

Несмотря на определенное с помощью геохимических методов низкое содержание примеси вещества ударника в расплавных импак-

титах Болтышской структуры, в составе акцессорных сульфидов установлено содержание ЭПГ и никеля, что свидетельствует об их концентрации в составе этих минералов и подтверждает то, что сульфиды — главные индикаторы присутствия метеоритного вещества в ударно-расплавленных породах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вальтер А.А., Рябенко В.А. Взрывные кратеры Украинского щита. — Киев : Наук. думка, 1977. — 155 с.
2. Гуров Е.П., Гурова Е.П. Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. — Киев : Наук. думка, 1991. — 160 с.
3. Гуров Е.П., Колесов Г.М., Гурова Е.П. Состав импактитов Болтышской астроблемы // Метеоритика. — 1986. — Вып. 45. — С. 150—155.
4. Гуров Е.П., Шехунова С.Б., Пермяков В.В. Болтышская импактная структура и ее ударнорасплавленные породы // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 5. — С. 66—89.
5. Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мацук М.С. и др. Геология астроблем. — Л. : Недра, 1980. — 232 с.
6. Минералы : Справ. / Гл. ред. Ф.В. Чухров. — М. : Изд-во АН СССР, 1960. — Т. 1., 618 с.
7. Andreoli M.A.G., Ashwal L.D., Hart R.J., Huinzenga J.M. A Ni- and PGE-enriched quartz norite melt complex in the Late Jurassic Morokweng impact structure, South Africa // Large meteorite impacts and planetary evolution II / Eds B.O. Dressler, V.L. Sharpton. — 1999. — P. 91—108. — (Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. ; No 339).
8. Bowles J.F.W., Howie R.A., Vaughan D.J., Zussman J. Rock-forming minerals. Vol. 5A. Non-silicates. Oxides, Hydroxides and Sulphides. — London : Geol. Soc., 2011. — 920 p.
9. Claeys P., Kiessling W., Alvarez W. Distribution of ejecta at the Cretaceous-Tertiary boundary // Catastrophic events and mass extinctions: Impacts and beyond / Eds C. Koeberl, K.G. MacLeod. — 2002. — P. 55—68. — (Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. ; No 356).
10. Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. Rock-Forming minerals. Vol. 5. Non-Silicates. — Harlow : United Kingdom, Longmans, 1962. — 371 p.
11. El Goresy. Die Erzminerale in den Ries- und Bosumtwi Kraterglasern und ihre genetische Deutung // Geochim. et cosmochim. acta. — 1964. — 28. — P. 881—892.
12. El Goresy A., Fechtig H., Ottemann J. The opaque minerals in impact glasses // Shock metamorphism of natural materials / Eds B.M. Short, M.N. French. — Baltimore, USA : Mono Book Corp., 1968. — P. 531—553.
13. Engelhardt W.V. Shock produced rocks from the Ries Crater // Contr. Mineral. and Petrol. — 1972. — 36. — P. 265—292.
14. Goderis S., Paquay F., Claeys P. Projectile identification in terrestrial impact structures and ejecta materi-

- al // Impact cratering: Processes and Products / Eds G.R. Osinski, E. Pierazzo. — Blackwell Publ. Ltd., 2013. — Vol. 1. — P. 223—238.
15. Grieve R.A.F., Reny G., Gurov E.P., Ryabenko V.A. The melt rocks of the Boltysh impact crater, Ukraine USSR // Contr. Mineral. and Petrol. — 1987. — 96. — P. 56—62.
  16. Gurov E.P., Kelley S.P., Koeberl C. Sediments and impact rock filling the Boltysh impact crater // Biological Processes Associated with Impact Events / Eds C. Coccei, C. Koeberl, I. Gilmour. — Berlin : Springer, 2006. — P. 335—358.
  17. Gurov E.P., Shekhunova S.B., Permyakov V.V. Accessory minerals from impact melt rocks of the Boltysh structure, Ukraine. Native metals and alloys // Lunar and Planet. Sci. Conf. : Abstr. — 44. — 2013. — #1217.
  18. Jolley D.W., Gilmour I., Gurov E. et al. Two large meteorite impacts at the K / Pg boundary // Geology. — 2010. — 38. — P. 835—838.
  19. Kelley S.P., Gurov E.P. Boltysh, another end-Cretaceous impact // Meteorit. and Planet. Sci. — 2002. — 37. — P. 1031—1043.
  20. McDonald I., Koeberl C., Gurov E. A Meteorite component in melt rocks from the Boltysh impact structure, Ukraine : First assessment // Lunar and Planet. Sci. Conf. : Abstr. — 40. — 2009. — #1252.
  21. Montanari A., Koeberl C. Impact stratigraphy. — Berlin : Springer, 2000. — 364 p.
  22. Palme H. Identification of projectiles of large terrestrial impact craters and some implications for the interpretation of Ir-rich Cretaceous-Tertiary boundary layers // Geological Implications of Impacts of large Asteroids and Comets on Earth / Eds L.T. Silver, P.H. Schultz. — 1982. — P. 223—233. — (Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. ; No 190).
  23. Palme H., Janessens M.J., Takahashi H. et al. Meteoritic material at five large impact craters // Geochim. et cosmochim. acta. — 1978. — 42, No 3. — P. 313—323.
  24. Ryder G. The unique significance and origin of the Cretaceous-Tertiary boundary: historical context and burdens of proof // The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history / Eds G. Ryder, D. Fastovsky, S. Gartner. — 1996. — P. 31—38. — (Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. ; No 307).
  25. Schmidt G., Palme H., Kratz K.L. The fractionation of highly siderophile elements (HSE) in impact melts and determination of the meteoritic components // Meteoritics. — 1995. — 30. — P. 573—574.
  26. Stahle V. Impact glasses from the suevite of the Nordlinger Ries // Earth and Planet. Sci. Lett. — 1972. — 17. — P. 275—293.

Поступила 26.12.2013

## REFERENCES

1. Val'ter, A.A. and Ryabenko, V.A. (1977), Naukova dumka, Kiev, Ukraine, 155 p.
2. Gurov, E.P. and Gurova, E.P. (1991), Naukova dumka, Kiev, Ukraine, 160 p.
3. Gurov, E.P., Kolesov, G.M. and Gurova, E.P. (1986), *Meteoritika*, Vyp. 45, pp. 150—155.



4. Gurov, E.P., Shehunova, S.B. and Permyakov, V.V. (2011), *Geofizicheskij zhurnal*, Vol. 33 No 5, pp. 66-89.
5. Masajtis, V.L., Danilin, A.N. and Mashhak, M.S. (1980), Nedra, Leningrad, Russia, 232 p.
6. (1960), *Mineraly*, spravochnik in Chuhrov, F.V. (Gl. red.), Izd-vo AN SSSR, Moskva, Russia, Vol. 1, 618 p.
7. Andreoli, M.A.G., Ashwal, L.D., Hart, R.J. and Huinzenga, J.M. (1999), *Large meteorite impacts and planetary evolution II*, in Dressler, B.O. and Sharpton, V.L. (eds), Geol. Soc. Amer., Spec. Pap., No 339, pp. 91-108.
8. Bowles, J.F.W., Howie, R.A., Vaughan, D.J. and Zussman, J. (2011), *Rock-forming minerals*, Vol. 5A, Non-silicates. Oxides, Hydroxides and Sulphides, Geol. Soc., London, 920 p.
9. Claeys, P., Kiessling, W. and Alvarez, W. (2002), Geol. Soc. Amer. Spec. Pap., No 356, *Catastrophic events and mass extinctions, Impacts and beyond*, in Koeberl, C. and MacLeod, K.G. (eds), pp. 55-68.
10. Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. (1962), United Kingdom, Longmans, Harlow, 371 p.
11. El Goresy, A. (1964), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 28, pp. 881-892.
12. El Goresy, A., Fechtig, H. and Ottemann, J. (1968), *Shock metamorphism of natural materials*, in Short, B.M. and French, M.N. (eds), Mono Book Corp., Baltimore, USA, pp. 531-553.
13. Engelhardt, W.V. (1972), *Contribs Mineral. and Petrol.*, Vol. 36, pp. 265-292.
14. Goderis, S., Paquay, F. and Claeys, P. (2013), *Impact cratering, Processes and Products*, in Osinski, G.R. and Pierazzo, E. (eds), Blackwell Publ. Ltd, Vol. 1, pp. 223-238.
15. Grieve, R.A.F., Reny, G., Gurov, E.P. and Ryabenko, V.A. (1987), *Contribs Mineral. and Petrol.*, Vol. 96, pp. 56-62.
16. Gurov, E.P., Kelley, S.P. and Koeberl, C. (2006), *Biological Processes Associated with Impact Events*, in Cocco, C. and Koeberl, I. (eds), Gilmour, Springer, Berlin, pp. 335-358.
17. Gurov, E.P., Shekhunova, S.B. and Permyakov, V.V. (2013), *Lunar and Planet. Sci. Conf. Abstr.*, 44, #1217.
18. Jolley, D.W., Gilmour, I. and Gurov, E. (2010), *Geology*, Vol. 38, pp. 835-838.
19. Kelley, S.P. and Gurov, E.P. (2002), *Meteorit. and Planet. Sci.*, Vol. 37, pp. 1031-1043.
20. McDonald, I., Koeberl, C. and Gurov, E.A. (2009), *Lunar and Planet. Sci. Conf. Abstr.*, 40, #1252.
21. Montanari, A. and Koeberl, C. (2000), Springer, Berlin, 364 p.
22. Palme, H. (1982), *Geological Implications of Impacts of large Asteroids and Comets on Earth*, Geol. Soc. Amer. Spec. Pap., No 190, in Silver, L.T. and Schultz, P.H. (eds), pp. 223-233.
23. Palme, H., Janessens, M.J. and Takahashim, H. (1978), *Geochim. et cosmochim. acta*, Vol. 42 No 3, pp. 313-323.
24. Ryder, G. (1996), The Cretaceous-Tertiary event and other catastrophes in Earth history, in Ryder, G., Fastovsky, D. and Gartner, S. (eds), pp. 31-38.
25. Schmidt, G., Palme, H. and Kratz, K.L. (1995), *Meteoritics*, Vol. 30, pp. 573-574.
26. Stahle, V. (1972), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 17, pp. 275-293.

Received 26.12.2013

Є.П. Гуров, В.В. Пермяков

Інститут геологічних наук НАН України  
01601, м. Київ, Україна, вул. О. Гончара, 55-б  
E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com

#### СУЛЬФІДИ В УДАРНО-РОЗПЛАВЛЕНИХ ПОРОДАХ БОЛТИСЬКОЇ ІМПАКТНОЇ СТРУКТУРИ

Проведено електронно-мікроскопічні дослідження акцесорної сульфідної мінералізації у складі ударно-розплавлених порід Болтиської імпаکتної структури Українського щита. Найпоширенішим сульфідом є гексагональний піротин, що утворює сферули та таблитчасті кристали розміром до 30 мкм у склуватій матриці розплавних імпаکتитів. Основна частина сферул — це високотемпературний піротин  $Fe_{0,88}S_{1,00}$ , у якому розповсюджені ділянки неправильної форми з підвищеним вмістом нікелю та міді. Окремі точкові аналізи сферул вказують на вміст у мінералі деяких елементів платинової групи (ЕПГ) у кількості до десятих часток процента. Сканування зерен піротину за розрізами доводить їх збагачення ЕПГ у два-чотири рази порівняно з вмісною матрицею. Сфалерит у розплавних імпактах утворює зерна неправильної форми зі вмістом заліза до 5 мас. %. У складі сфалериту встановлено вміст ЕПГ у декілька разів вищий, ніж у матриці. Точковий мікрозондовий аналіз дозволив встановити наявність окремих ЕПГ у мінералі (до 0,1 мас. %). Проведені дослідження підтверджують роль сульфідів у складі ударно-розплавлених порід як концентраторів нікелю та ЕПГ, імовірним джерелом яких була речовина ударника, що утворив Болтиську імпактну структуру.

*Ключові слова:* імпактна структура, ударно-розплавлена порода, акцесорій, сульфід, піротин, нікель, платиноїд.

Ye.P. Gurov, V.V. Permyakov

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine  
55-b, O. Honchar str., 01601, Kyiv, Ukraine  
E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com

#### SULFIDES IN IMPACT MELT ROCKS OF THE BOLTYSH IMPACT STRUCTURE

The Boltys impact structure, 24 km in diameter, is located in the central part of the Ukrainian Shield. The structure was formed  $65.17 \pm 0.64$  Ma in the Precambrian crystalline rocks of the shield. The circular sheet of impact melt rocks, 12 km in diameter and about 220 m thick, occupies the central deepest part of the crater around the central high. The composition and structure of melt sheet are known mainly from two boreholes No 11475 and No 50 located in the SW area of the crater. The melt sheet is composed of two horizons. The lower one, up to 140 m thick, is com-

posed of glassy matrix melt rocks with microliths of feldspars and orthopyroxene. The upper horizon, to 80 m thick, is composed of microliths of feldspars and completely chloritized pyroxene in cryptocrystalline matrix. The electron microscopy investigation of accessory sulfide mineralization in the impact melt rocks of the Boltsh structure was made. Pyrrhotite is the most abundant sulfide mineral that occurs in the melt rocks of the lower horizon of the sheet. Pyrrhotite forms spherules and hexagonal crystallites up to 30  $\mu\text{m}$  in diameter, while the predominant part of its segregations is presented by the high-temperature hexagonal pyrrhotite  $\text{Fe}_{0.88}\text{S}_{1.00}$ ; some areas in its spherules discover their enrichment in nickel and copper. The content of the platinum group elements (PGE) to 0.1n % was determined in some points of pyrrhotite spherules. The scanning of pyrrhotite segregations constantly shows their enrichment in the PGE from 2 to 4 times relative to their

content in surrounding matrix of impact melt rocks. Sphalerite forms rare grains and segregations in the impact melt sheet. Iron content up to 5 % is the main admixture of the mineral composition. The content of the PGE to 0.1n — 0.01n % was determined by the point microprobe analyses in some areas of sphalerite grains and segregations. The enrichment of sphalerite in the PGE also is confirmed by scanning of the electron profiles of its grains that shows the enrichment of the composition of mineral in the PGE relatively to their content in matrix of impact melt rocks. The high content of the PGE and nickel in the composition of sulfide minerals from impact melt rocks confirms their role in the concentration of those elements as the tracks of the matter of impactor of the Boltsh structure.

*Keywords:* impact structure, impact melt rock, accessory mineral, sulfide, pyrrhotite, nickel, platinum group element.