

УДК 549.3 : 523.681.8

Е.П. Гуров, В.В. Пермяков

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

САМОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ В УДАРНО-РАСПЛАВЛЕННЫХ ПОРОДАХ БОЛТЫШСКОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУКТУРЫ

Электронно-микроскопические исследования ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры на Украинском щите позволили установить в них комплекс аксессуарных самородных металлов и сплавов, образовавшихся на различных этапах формирования мощной толщи импактитов. Цинково-медный сплав, медистое серебро и золото в виде единичных зерен распространены в составе расплавленных импактитов нижнего горизонта толщи, состоящих из микролитов ромбического пироксена и полевых шпатов, погруженных в стекловатую матрицу. Локализация этих минералов в стекловатой матрице расплавленных импактитов, не несущих следов вторичных изменений, свидетельствует об их кристаллизации в остаточном ударном расплаве до его затвердевания. Самородные металлы: медь, платина, купроплатина, серебро и железо, распространены в ударно-расплавленных породах верхнего горизонта, подверженных интенсивной хлоритизации. Форма выделения самородных металлов в виде микропрожилков и их тесная связь с агрегатами хлорита доказывают их образование после полной солидификации пород в процессе вторичного изменения импактитов. Проявление аксессуарной минерализации самородной платины, купроплатины, меди и серебра в ударно-расплавленных породах кислого состава с содержанием около 68 мас. % SiO_2 , вероятно, связано с наличием примеси в породах вещества астероида, образовавшего Болтышскую структуру.

Ключевые слова: импактная структура, ударно-расплавленная порода, самородная медь, самородная платина, медистое серебро, хлоритизация.

Введение. Самородные металлы и сплавы редко встречаются в составе ударно-расплавленных пород импактных структур. За исключением импактной структуры Садбери на Канадском щите, в составе комплекса пород и руд которой описан ряд самородных металлов, в том числе серебро, золото и медь [20, 26], известны только весьма редкие находки этих минералов в составе пород импактных структур, например, кратера Мороквенг и Западной импактной структуры [15, 17, 21]. Исключение составляют самородное и никелистое железо, которые описаны в ударно-расплавленных породах и стеклах многих импактных структур [22, 25, 27]. С помощью электронно-микроскопического исследования импактитов Болтышской структуры был установлен ряд самородных металлов и сплавов, кристаллизовавшихся на различных стадиях образования и

охлаждения мощной толщи ударно-расплавленных пород. Кроме ранее описанных в единичных импактных структурах на поверхности Земли самородных металлов: платины, меди и серебра, в породах Болтышской структуры впервые установлены купроплатина, латунь и медистое серебро.

Болтышская импактная структура в центральной части Украинского щита содержит кольцеобразную толщу ударно-расплавленных пород мощностью до 219 м, окружающую центральное поднятие. Строение толщи и состав слагающих ее пород охарактеризованы в ряде работ [4, 6, 9, 11, 28]. Петрографические и минералогические исследования расплавленных импактитов позволили выделить в составе толщи два главных горизонта [9, 11, 28].

Нижний горизонт расплавленных импактитов, слагающий преобладающую по мощности нижнюю часть разреза их толщи, представлен породами с микролитами полевых шпатов и

ромбического пироксена в стекловатой или частично девитрифицированной матрице (рис. 1, *a*).

Верхний горизонт толщи состоит из полнокристаллических пород с микролитами полевых шпатов и полностью замещенного хлоритом пироксена в тонкозернистой полнокристаллической матрице кварц-полевошпатового состава (рис. 1, *b*). Хлоритизация пироксена и полная раскристаллизация матрицы расплавленных импактитов верхнего горизонта являются следствием гидротермальных процессов, связанных с взаимодействием поверхности остывающей толщи ударно-расплавленных пород с атмосферными водами [9, 30]. Проявления гидротермальной деятельности в импактитах описаны на примере ряда импактных структур, в том числе Садбери [19, 26], Пучеж-Катунской, Попигайской, Карской и некоторых других [15, 32].

Материалы и методы исследований. Материалом для исследований служили образцы ударно-расплавленных пород из керна скв. № 50 и 11475, пробуренных на расстоянии, соответственно, 4,9 и 3,5 км к юго-западу от центра Болтышской структуры и вскрывших толщу расплавленных импактитов мощностью 143 и 219 м. Электронно-микроскопические исследования проведены на образцах пород, отобранных на полную мощность толщи, включая 15 образцов из скв. № 50 и 9 — скв. № 11475. Отбор об-

разцов был проведен на основании петрографического изучения шлифов пород на оптическом микроскопе, что позволило провести электронно-микроскопические исследования всех важнейших разновидностей расплавленных импактитов.

Изучение строения и состава аксессуарных минералов выполнено в Институте геологических наук (ИГН) НАН Украины на сканирующем электронном микроскопе *JEOL JSM-6490LV* с установленной на нем системой рентгеновского микроанализа *INCA Energy⁺ (Oxford instruments)*. Система состоит из энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) *INCA-act* с аналитическим кремний-дрейфовым детектором (*ADD*) и волнового дисперсионного спектрометра (ВДС) *INCA WAVE 500* с программным обеспечением, предусматривающим проведение анализов с использованием их отдельно или совместно.

Электронно-микроскопические исследования проведены в фазоконтрастном режиме отраженных электронов (*BSEI*). Рентгеновский микроанализ проведен при ускоряющем напряжении 20 кэВ и токах пучка 1–1,5 нА при анализах на ЭДС и 25–30 — при использовании ВДС. Чувствительность измерений составляла <0,2 % для ЭДС и <0,01 — для ВДС. Для калибровки спектрометров использовали 55 эталонов универсальной коллекции (*Micro-Analysis Consultants Ltd., Cambridgeshire*

Рис. 1. Микрофотографии шлифов главных типов ударно-расплавленных пород Болтышской структуры: *a* — ударно-расплавленная порода со стекловатой матрицей нижнего горизонта толщи импактитов. Призматические микролиты полевых шпатов (белые) и гиперстена (серые с высоким рельефом) в стекловатой матрице. В центре — скелетный кристаллит феррогиперстена. Участки девитрификации стекла в виде темно-серых пятен с нечеткими контурами в правой и нижней частях изображения (скв. № 11475, гл. 761 м, без анализатора); *b* — микрокристаллическая ударно-расплавленная порода верхнего горизонта толщи импактитов. Призматические и коробчатые микролиты полевых шпатов (белые) и замещенные хлоритом призматические микролиты пироксена (темно-серые вверху слева) окружены сферолитовой и микрокристаллической матрицей (скв. № 50, гл. 623 м, без анализатора)

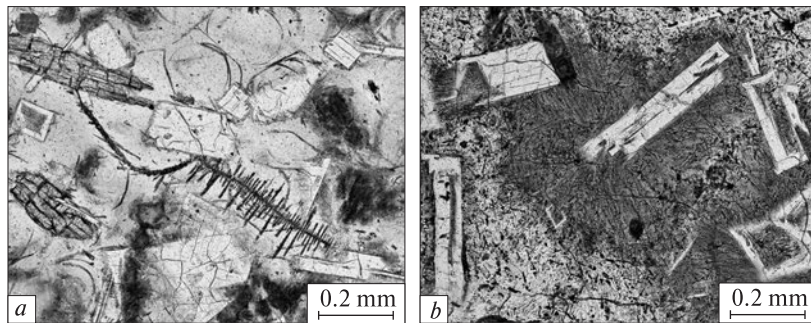


Fig. 1. Microphotographs of the main types of impact melt rocks of the Boltsh structure: *a* — the glassy matrix impact melt rock of the lower unit of the melt sheet. The prismatic microcrystals of feldspars (white) and hypersthene (grey with a high relief) occur in the glassy matrix. In the central part of the image the skeletal growth of ferrohypersthene. Dark grey areas in upper right and upper left of image represent a devitrification of the glassy matrix (borehole No 11475, depth 761 m, plan-polarized light); *b* — the microcrystalline impact melt rock of the upper unit of the melt sheet. Prismatic and hollow microcrystals of feldspars (white) and replaced by chlorite prismatic microcrystals of pyroxene (dark grey in the upper left part of image) are surrounded by the spherulitic and microcrystalline groundmass (borehole No 50, depth 623 m, plan-polarized light)

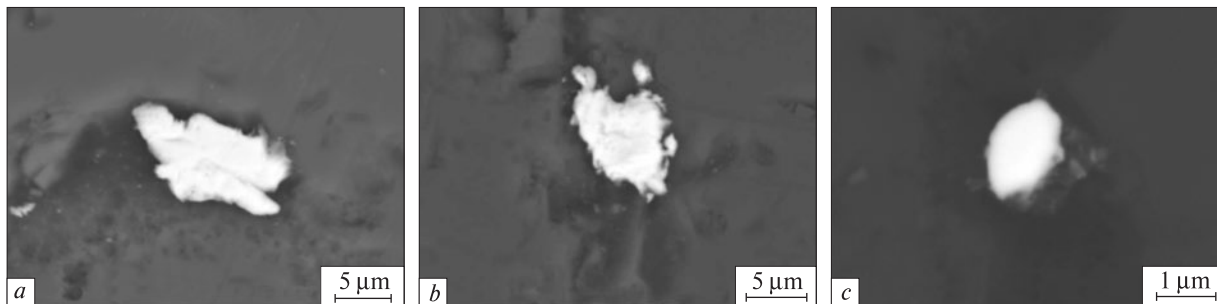


Рис. 2. Акцессорная минерализация сплавов и самородного золота в ударно-расплавленных породах нижнего горизонта импактной толщи Болтышской структуры (скв. № 11475, гл. 761 м, микрофотографии в режиме отраженных электронов): *a* — зерно неправильной формы природной латуни в стекловатой матрице, *b* — выделение медистого серебра в стекловатой матрице, *c* — частица самородного золота в стекле

Fig. 2. Accessory mineralization of alloys and native gold in glassy matrix melt rocks of the lower horizon of impact melt sheet of the Boltysk structure (borehole No 11475, depth 761 m, BSE images): *a* — irregularly shaped grain of natural brass in glassy matrix, *b* — irregular grain of cupreous silver in glassy matrix, *c* — particle of native gold in glass

PE27 3LF UK), а также эталоны лаборатории физических методов исследований ИГН НАН Украины.

Результаты. В составе нижнего горизонта ударно-расплавленных пород со стекловатой матрицей, мощность которого по разрезу в скв. № 11475 составляет 135 м, установлена акцессорная минерализация, представленная цинково-медным сплавом, медистым серебром и золотом.

Таблица 1. Состав латуни, медистого серебра и самородного золота в породах нижнего горизонта толщи ударно-расплавленных пород Болтышской структуры

Table 1. Composition of brass, copper-silver alloy and native gold in the lower horizon of the sheet of impact melt rocks of the Boltysk structure

Образец	Cu-Zn	Cu-Zn	Ag-Cu	Au
	42	43	41	D-2
Cu	60,26	61,88	26,76	0,83
Ag	—	—	72,39	—
Au	—	—	—	92,59
Fe	—	—	—	0,76
Zn	35,84	37,51	—	—
Pt	—	—	—	—
Si	—	0,43	1,05	2,24
Сумма	96,10	99,82	102,12*	100,00**

Примечание. EDS данные, "—" (низкие значения концентрации) — WDS данные; * сумма анализа содержит 1,92 мас. % кислорода, ** сумма анализа содержит 2,85 мас. % кислорода и 0,73 — алюминия.

Note. EDS data, "—" (low contents) — WDS data; * the analysis sum includes 1.92 wt. % of oxygen, ** the analysis sum includes 2.85 wt. % of oxygen and 0.73 wt. % of aluminium.

Цинково-медный сплав (природная латунь) представлен единичными зёрнами неправильной, часто изометрической формы размером от 2×3 до 7×15 мкм, погруженными в стекловатую матрицу (рис. 2, *a*). Содержание цинка составляет 35,8—37,5 мас. %. Отношение атомных количеств меди и цинка колеблется в пределах от 1,7 : 1 до 1,8 : 1 (табл. 1). Впервые природная латунь была установлена в составе лунных базальтов [18]. В последнее время латунь с разными соотношениями меди и цинка описана в составе рудных месторождений в Китае [34], а также в некоторых золоторудных месторождениях России, в том числе на Березовском месторождении [1, 13]. В ударно-расплавленных породах импактных структур этот минерал диагностирован впервые.

Зерно медистого серебра размером 7×9 мкм с содержанием меди 26,8 мас. % установлено в составе той же породы со стекловатой матрицей, что и латунь. Зерно имеет изометрическую форму и погружено в стекло (рис. 2, *b*). Наличие примеси кремния и кислорода в составе проанализированного образца, предположительно, связано с влиянием матрицы (табл. 1). Кроме зерна медистого серебра в том же образце расплавленного импактита наблюдались единичные зёрна самородного серебра неправильной формы размером до 3 мкм с содержанием меди 2,5—2,6 мас. %. Ранее самородное серебро с высоким содержанием меди и цинка было описано в составе щелочных базальтоидов [14].

Единственное зерно самородного золота определено в составе образца расплавленного импактита, в котором присутствуют медистое се-

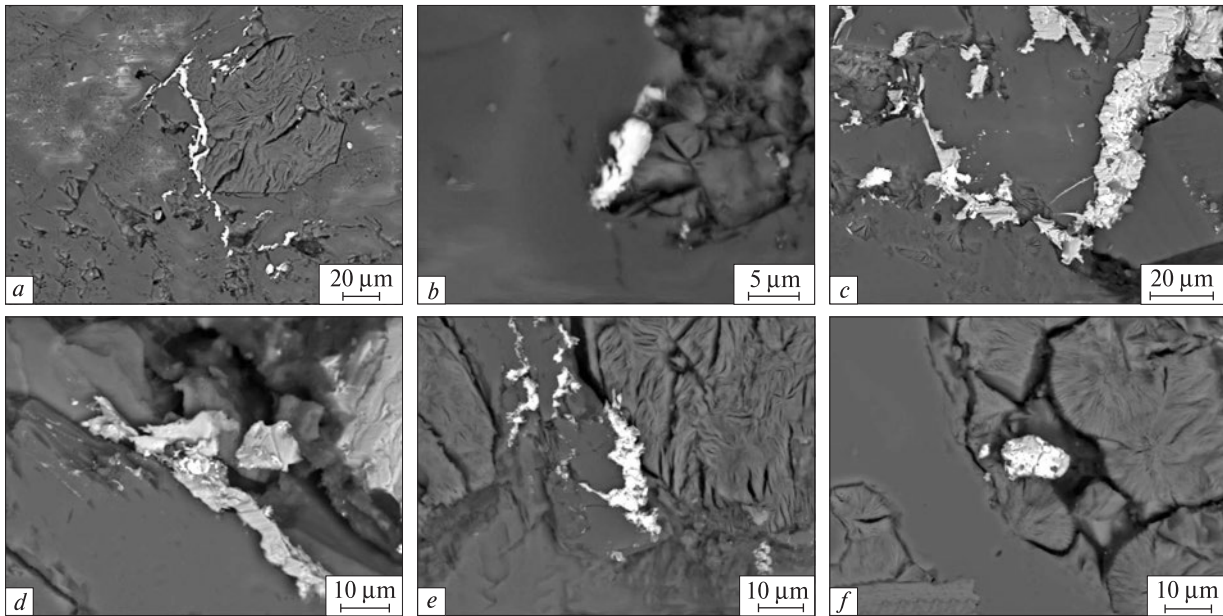


Рис. 3. Самородные металлы в микрокристаллических породах верхнего горизонта толщи расплавных импактивов Болтышской структуры (сква. № 50, гл. 650 м, микрофотографии в режиме отраженных электронов): *a* — прожилков самородной меди (белый) на контакте зерен хлорита и матрицы, *b* — самородная платина на контакте тонкокристаллической матрицы и хлорита, *c* — включения платины (белые) в прожилках самородной меди (светло-серые), *d* — зерна купроплатины (белые) в самородной меди, *e* — микропрожилки самородного серебра (белые) на границе агрегатов хлорита и матрицы, *f* — зерно самородного железа в хлорите

Fig. 3. Native metals in microcrystalline rocks of the upper horizon of impact melt sheet of the Boltys structure (borehole No 50, depth 650 m, BSE images): *a* — microvein of copper (white) at the boundary of chlorite and matrix, *b* — native platinum (white) at the boundary of chlorite and matrix, *c* — grains of native platinum (white) in veinlets of copper (light grey), *d* — grains of native cuproplatinum (white) in native copper, *e* — veinlets of native silver (white) at the boundary of aggregate of chlorite surface and matrix, *f* — grain of native iron in chlorite

ребро и латунь. Зерно овальной формы размером $1,5 \times 2,0$ мкм (рис. 2, *c*), его состав, мас. %: золото — 92,59, железо — 1,2 и медь — 0,9. Наличие примесей кремнезема, алюминия и кислорода связано с влиянием матрицы (табл. 1). Расположение зерна в свежей стекловатой матрице и его каплеобразная форма свидетельствуют об образовании в остаточном расплаве до застывания последнего в виде стекла.

Аксессуарная минерализация цинково-медного сплава, медистого серебра и самородного золота в виде изометрических, каплеобразных или овальных зерен в стекловатой матрице ударно-расплавленных пород свидетельствует об их кристаллизации из остаточного расплава после выделения микролитов ромбического пироксена и полевых шпатов.

Самородные металлы: медь, платина, купроплатина, серебро и железо, установлены в породах верхнего горизонта толщи ударно-расплавленных пород, испытавших интенсивные автогидротермальные изменения. Важнейшими следствиями преобразования пород под

воздействием гидротермальных процессов являются хлоритизация пироксена, а также полная раскристаллизация матрицы, что служит важным их отличием от пород нижнего горизонта со стекловатой матрицей.

Самородная медь наблюдается в виде микропрожилков и выделений неправильной формы, которые расположены на контактах зерен хлорита и микролитов полевых шпатов с криптокристаллической матрицей, а также образуют микропрожилки в матрице (рис. 3, *a*). Их толщина колеблется от 1–2 до 10–15 мкм, длина достигает 100–150 мкм. В составе некоторых прожилков присутствуют включения зерен платины, купроплатины, в одном выделении — серебра. Содержание меди в минерале составляет 96–99 мас. %. Наиболее распространенная примесь представлена железом, содержание которого в некоторых зернах достигает 3 мас. % (табл. 2). Ранее самородная медь была описана в составе поздних гидротермальных образований импактной структуры Садбери [26].

Самородная платина распространена в ударно-расплавленных породах совместно с самородной медью. Она представлена как в виде сростков или отдельных зерен неправильной формы, так и в виде прожилков в криптокристаллической матрице и на контактах микролитов с матрицей (рис. 3, *b*). Наблюдаются также включения зерен платины микронной размерности в прожилках и скоплениях зерен самородной меди (рис. 3, *c*). Размеры зерен платины составляют от 2×2 до 3×8 мкм, агрегатных образований — до 8×15 мкм. Содержание платины в минерале — до 99 мас. %, примесей железа — 2,2, меди — до 2,2 и кремния — до 0,7 мас. % (табл. 2).

Самородная платина весьма редко наблюдалась в составе ударно-расплавленных пород метеоритных кратеров. Единственная частица самородной платины описана в расплавленных импактитах ударной структуры Мороквенг в Южной Африке, в составе которых определено высокое содержание примеси вещества кратерообразующего астероида [21]. Кроме того, зерна самородной платины описаны в составе отложений пограничного мел-палеогенового слоя дальних выбросов кратера Чиксулуб [24].

Купроплатина установлена в виде зерен неправильной формы размером до 5 мкм в составе расплавленного импактита, содержащего самородную платину и медь. Ее выделения образуют включения в самородной меди (рис. 3, *d*) и на электронно-микроскопических изображениях трудно отличимы от включений платины.

Зерна и агрегаты купроплатины гомогенны и не содержат следов распада. Состав минерала, мас. %: платина — 80–85, медь — 12–15, железо — 1,8 (табл. 2). Наблюдалось единичное зерно купроплатины с содержанием меди 38,6 мас. %. Впервые этот минерал совместно с самородной платиной описан А.Г. Бетехтиным в массивах пород ультраосновного состава на Урале, подверженных серпентинизации и хлоритизации [2]. Для некоторых выделений купроплатины были установлены следы распада в виде микрокристаллических выделений меди. Источником платины и купроплатины, предположительно, служила рассеянная сульфидная минерализация массивов [2, 12].

Самородное серебро распространено в составе ударно-расплавленной породы, содержащей самородную медь и платину. Минерал представлен в виде прожилков на границах матрицы и хлоритовых выделений, а также в виде зерен неправильной формы и их скоплений (рис. 3, *e*). Размеры зерен и агрегатов серебра составляют от 1–2 до 20 мкм; прожилки достигают длины до 50–60 мкм. Содержание серебра в минерале составляет 95–99 мас. %, в виде примеси установлено железо — до 0,7, в отдельных анализах присутствует кремний — до 0,6 (табл. 2). Ранее самородное серебро было описано в импактной структуре Садбери, где его редкие зерна наблюдались в виде включений в борните из гидротермальных жил в основании рудных тел [20, 26], а также в составе продуктов гидротермального

Таблица 2. Состав самородных металлов из гидротермально измененных ударно-расплавленных пород Болтышской структуры

Table 2. Composition of native metals from the hydrothermally altered impact melt rocks of the Boltys structure

Образец	Cu	Cu	Pt	Pt	Cu-Pt	Ag	Ag	Fe	Fe
	11	D-3	67	H-3	52	D-6	68	64	51
Cu	97,25	99,18	—	0,55	12,31	—	—	—	—
Pt	—	—	99,04	96,48	86,44	—	—	—	—
Ag	—	—	—	—	—	99,87	100,60	—	—
Au	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe	2,39	0,44	0,96	1,21	1,80	0,70	—	98,70	95,28
Mn	—	—	—	—	—	—	—	0,70	0,72
Ni	—	—	—	—	—	—	—	—	0,14
Co	—	—	—	—	—	—	—	—	0,10
Cr	—	—	—	—	—	—	—	—	0,88
Si	—	0,56	—	0,70	—	—	0,44	—	2,42
Сумма	99,64	100,18	100,00	98,94	100,55	100,57	101,04	99,40	99,54

Примечание. ЕДС данные, "—" (низкие значения концентрации) — ВДС данные.

Note. EDS data, "—" (low contents) — WDS data.

изменения зювитов Западной и Ильинецкой структур [15].

Самородное железо представлено единичными зернами неправильной формы в составе породы, содержащей выделения описанных выше самородных металлов. Зерна железа неправильной формы размером 5–15 мкм, наиболее крупное зерно — 55×120 . Выделения железа расположены на границе матрицы и агрегатов хлорита или внутри последних (рис. 3, *f*). Состав самородного железа представлен в табл. 2. Содержание железа в минерале составляет от 95,3 до 100,0 мас. %. В качестве примеси установлен марганец в количестве 0,6–0,7 мас. %. Необходимо отметить отсутствие или низкое содержание в составе проанализированных зерен железа примесей никеля и кобальта, являющихся характерными элементами-примесями в составе самородного железа из пород ряда импактных структур. Шаровидные выделения железа с низким содержанием никеля описаны в шлаковидных частицах из зювитов Болтышской, Ильинецкой и Западной импактных структур [16]. В кратерах Вабар, Рис, Хенбери, Барринджер и Лаппаярви в составе стекол и расплавных импактитов содержатся сферулы самородного железа с содержанием никеля от 4 мас. % и выше, образовавшиеся при плавлении или испарении/конденсации вещества ударника и захваченные ударным расплавом [22, 25, 27]. Форма выделений и состав самородного железа из расплавных импактитов Болтышского кратера отличаются от таковых из других импактных структур и свидетельствуют об его поздней кристаллизации при автогидротермальных процессах.

Выводы. Акцессорная минерализация самородных металлов и сплавов в Болтышской структуре образована в различных условиях и на разных этапах становления толщи расплавных импактитов.

Минерализация цинково-медного сплава, медистого серебра и золота локализована в свежей стекловатой матрице пород нижнего горизонта толщи расплавных импактитов, не несущих признаков гидротермальной переработки. Нахождение этих минералов в стекловатой матрице свидетельствует об их образовании до солидификации остаточной порции импактного расплава после кристаллизации микролитов гиперстена и полевых шпатов. Состав матрицы, представляющей собой про-

дукт затвердевания остаточного расплава импактитов, приближается к составу гранитной эвтектики [9, 28], что позволяет оценить приблизительные значения температуры ее затвердевания с использованием данных экспериментальных исследований гранитных систем. Температура кристаллизации гранитного расплава эвтектического состава при давлении $P_{H_2O} = 0,5$ кбар составляет около 780 °C [26]. Эта температура, предположительно, принимается как вероятная температура застывания стекловатой матрицы расплавных импактитов Болтышской структуры. Температура кристаллизации латуни с содержанием 35–40 мас. % цинка составляет 900 [5] и золота — 1032 °C [12], что согласуется с данными об их образовании в остаточном расплаве до его затвердевания, но после кристаллизации микролитов гиперстена при температуре около 1050 °C [23]. Образование золота, медистого серебра и цинково-медного сплава на поздней стадии солидификации ударного расплава происходило в восстановительных условиях, что доказывается повышением степени восстановления железа в расплавных импактитах относительно гранитоидных пород мишени кратера. Отношение окисного железа к закисному составляет 0,50 в составе пород мишени и понижается до 0,32 в составе ударно-расплавленных пород нижнего горизонта, достигая 0,15–0,09 в разностях этих пород со свежей стекловатой матрицей [7, 29]. Согласно данным работы [13], образование самородных железа и меди в некоторых типах горных пород происходит в восстановительных условиях на позднемагматической стадии интрузивного процесса.

Самородные металлы: медь, платина, купроплатина, серебро и железо, установлены в породах верхнего горизонта толщи расплавных импактитов Болтышской структуры, подверженных интенсивной хлоритизации. Выделения этих минералов в форме микропрожилков в матрице или на контактах матрицы и хлорита свидетельствуют об их образовании после полного затвердевания ударного расплава. Тесная пространственная ассоциация самородных металлов с выделениями хлорита, замещающего микролиты пироксена, позволяет предполагать их одновременное или близкое по времени образование при автогидротермальной переработке ударно-расплавленных пород верхнего горизонта толщи. Оценка температуры гидротермальных процессов в

верхнем горизонте толщи импактитов может быть выполнена с использованием состава сфалерита, образующего включения в хлорите. Содержание в сфалерите около 8–10 мол. % FeS свидетельствует об его кристаллизации при температуре около 300–350 °С [10]. В качестве источника вещества для образования самородных металлов, предположительно, рассматривается акцессорная минерализация пирротина, которая распространена в породах нижнего горизонта, но вследствие растворения полностью отсутствует в составе пород верхнего горизонта расплавных импактитов Болтышской структуры. В составе пирротина установлено высокое содержание меди, никеля, а также примеси платины (до 4 мас. %) — в локальных участках единичных сферул этого минерала [8, 30].

Проявления некоторых самородных металлов ранее были описаны в импактной структуре Садбери. Мелкие зерна серебра, золота, электрума и меди установлены в составе эпидотовых и сульфидных жил с борнитом и халькопиритом, образовавшихся в результате гидротермальных процессов при растворении рудных масс существенно пирротинового состава [19, 20, 26]. Согласно данным этих авторов, температура гидротермальных растворов составляла от <200 до 350 °С. Близкие значения температуры автогидротермальных процессов при образовании некоторых импактных струк-

тур, в том числе Карской, Пучеж-Катунской и Попигаической, описаны в работе [32]. По данным изучения газовой-жидких включений в минералах, сопровождающих образование теллуридов висмута и самородного золота в Западной импактной структуре, температура гидротермального процесса — около 250–260 °С [17]. Согласно представлениям М.И. Новгородовой [13], обязательное условие образования самородных металлов при гидротермальном процессе — высоковосстановительные условия среды минералообразования.

Проявления самородных платины, меди, серебра и латуни в расплавных импактитах, содержащих 68–70 % SiO₂ и образовавшихся при плавлении пород мишени гранитоидного состава, представляются экзотическими. Нейтронно-активационный анализ образцов ударно-расплавленных пород Болтышской структуры позволил установить в них повышение содержания никеля, кобальта, хрома, а также некоторых элементов платиновой группы относительно их содержания в гранитоидных породах мишени [7, 31]. Таким образом, акцессорная минерализация самородных металлов, а также распространение никель- и медьсодержащего пирротина и хромсодержащего гематита в ударно-расплавленных породах Болтышской структуры могут быть объяснены наличием примеси глубоко переработанного вещества ударника хондритового состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акимова А.В., Мохов А.В., Плотинская О.Ю.* Первая находка природной латуни на Березняковском эпитептермальном золоторудном месторождении (Южный Урал) // Федоровская сессия : Тез. — СПб., Россия, 2008. — С. 238–240. — RMS DPI 2008-2-75-0.
2. *Бетехтин А.Г.* Платина и некоторые другие минералы платиновой группы. — М. : Изд-во АН СССР, 1935. — 148 с.
3. *Бондаренко В.М., Голубев В.А., Злобенко И.Ф., Мельничук Э.В., Радченко О.Ф., Татаринцев В.И., Цымбал С.Н.* О находке золота в брекчированном габбро западной части Украинского щита // Минерал. журн. — 1981. — 3, № 2. — С. 98–101.
4. *Вальтер А.А., Рябенко В.А.* Взрывные кратеры Украинского щита. — Киев : Наук. думка, 1977. — 155 с.
5. *Волков А.И., Жарский И.М.* Большой химический справочник. — Минск : Сов. шк., 2005. — 608 с.
6. *Гуров Е.П., Гурова Е.П.* Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. — Киев : Наук. думка, 1991. — 160 с.
7. *Гуров Е.П., Колесов Г.М., Гурова Е.П.* Состав импактитов Болтышской астроблемы // Метеоритика. — 1986. — Вып. 45. — С. 150–155.
8. *Гуров Е.П., Пермяков В.В.* Сульфиды в ударно-расплавленных породах Болтышской импактной структуры // Минерал. журн. — 2014. — 36, № 3. — С. 76–85.
9. *Гуров Е.П., Шехунова С.Б., Пермяков В.В.* Болтышская импактная структура и ее ударно-расплавленные породы // Геофиз. журн. — 2011. — 33, № 5. — С. 66–89.
10. *Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж.* Породообразующие минералы. — М. : Мир, 1966. — Т. 5. — 408 с.
11. *Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шаденков Е.М.* Геология астроблем. — Л. : Недра, 1980. — 232 с.
12. *Минералы* : Справ. / Гл. ред. Ф.В. Чухров. — М. : Изд-во АН СССР, 1960. — Т. 1. — 618 с.
13. *Новгородова М. И.* Самородные металлы. — М. : Знание, 1987. — 48 с.

14. Новгородова М.И., Юсупов Р.Г., Свешникова Е.В. Самородные металлы и карбиды из трубок взрыва щелочных базальтоидов // Самородные металлы в изверженных горных породах : Тез. докл. Всесоюз. конф. "Самородное элементообразование в эндогенных процессах". — Якутск : Якут. фил. СО АН СССР, 1985. — Ч. 1. — С. 12—14.
15. Татаринцев В.И. Рудные минералы и их генезис в породах взрывных кольцевых структур Украины : Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — Киев, 1984. — 18 с.
16. Татаринцев В.И., Цымбал С.Н. Рудные минералы взрывных структур // Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. — М. : Недра, 1985. — С. 97—134.
17. Татаринцев В.И., Цымбал С.Н., Лежкова Г.В., Самойлович Л.Г., Шаркин О.П. Теллуриды висмута в породах взрывной структуры Украинского щита // Геол. журн. — 1985. — **45**, № 3. — С. 75—82.
18. Фрондел Дж. Минералогия Луны. — М. : Мир, 1978. — 334 с.
19. Ames D.E., Jonasson I.R., Gibson H.L., Pope K. Impact-generated hydrothermal system — constraints from the large paleoproterozoic Sudbury crater // Biological processes associated with impact events / Eds. C. Cockell, C. Koeberl, I. Gilmour. — Berlin : Springer, 2006. — P. 21—100.
20. Ames D.F., Kjarsgaard I.M., Doumas S.L. Sudbury Ni—Cu—PGE ore mineralogy compilation: Sudbury Targeted Geoscience Initiative. — Geol. Surv. Canada, 1787. — 2003. — CD-ROM.
21. 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).
22. Blau P.J., Axon H.J., Goldstein J.I. Investigation of the Canyon Diablo metallic spheroids and their relationship to the breakup of the Canyon Diablo meteorite // J. Geophys. Res. — 1973. — **78**. — P. 363—374.
23. Bowen N. L., Schairer J. F. The system MgO — FeO — SiO₂ // Amer. J. Sci. — 1935. — **29**. — P. 151—217.
24. Doehne E., Margolis S.V. Trace-element geochemistry and mineralogy of the Cretaceous/Tertiary boundary; Identification of extraterrestrial components // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. — 1990. — **247**. — P. 367—382.
25. El Goresy A. 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.
26. Farrow C.E.G., Watkinson D.H. Diversity of precious-metal mineralization in footwall Cu—Ni—PGE deposits, Sudbury, Ontario: implications for hydrothermal models of formation // Can. Miner. — 1997. — **35**. — P. 817—839.
27. Fregerlev S., Carstens H. Fe Ni metal in impact melt rocks of the Lappajärvi, Finland // Contribs Mineral. and Petrol. — 1976. — **55**. — P. 256—263.
28. Grieve R. A. F., Reny G., Gurov E. P., Ryabenko V. A. The melt rocks of the Boltysk impact crater, Ukraine, USSR // Contribs Mineral. and Petrol. — 1987. — **96**. — P. 56—62.
29. Gurov E.P., Kelley S.P., Koeberl C., Dykan N.I. Sediments and impact rocks filling the Boltysk impact crater. // Biological processes associated with impact events / Eds. C. Cockell, C. Koeberl, I. Gilmour. — Berlin : Springer, 2006. — P. 335—358.
30. Gurov E.P., Shekhunova S.B., Permyakov V.V. Accessory and opaque minerals in impact melt rocks of the Boltysk structure, Ukraine // Meteoritics and Planet. Sci. — 2015. — **50**. — P. 1139—1155.
31. McDonald I., Koeberl C., Gurov E. A meteorite component in melt rocks from the Boltysk impact structure, Ukraine : First Assessment // Lunar and Planet. Sci. Conf. : Abstr. — **40**. — 2009. — No 1252.
32. Naumov M.V. Impact-generated hydrothermal systems: data from Popigai, Kara, and Puchezh-Katunki impact structures // Impacts in Precambrian Shields / Eds. J. Plado, L.J. Pesonen. — Berlin : Springer, 2002. — P. 117—171.
33. Tuttle O.F., Bowen N.L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈—KAlSi₃O₈—SiO₂—H₂O. — Geol. Soc. Amer. Mem. — 1958. — **74**. — 153 p.
34. Xie Y., Hou Z., Xu J., Yuan Z., Bai G., Li X. Discovery of Cu—Zn, Cu—Sn intermetallic minerals and its significance for genesis of the Mianning-Dechang REE Metallogenic Belt, Sichuan Province, China // Sci. of China. Ser. D 49. — 2006. — P. 597—603.

Поступила 20.08.2015

REFERENCES

1. Akimova, A.V., Mokhov, A.V. and Plotinskaya, O.Ju. (2008), *Fedorovskaya sessiya*, Abstract, St-Peterbourg, Russia, pp. 238-240, RMS DPI 2008-2-75-0.
2. Betehtin, A.G. (1935), *Platina i nekotorye drugie mineraly platinovoj grupy*, Izd-vo Acad. Sci. of USSR, Moscow, 148 p.
3. Bondarenko, V.M., Golubev, V.A., Zlobenko, I.F., Melnichuk, E.V., Radchenko, O.F., Tatarintsev, V.I. and Tsymbal, S.N. (1981), *Mineralogical Journal (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 3 No 2, pp. 98-101.
4. Välter, A.A. and Ryabenko, V.A. (1977), *Vzryvnye kratery Ukrainskogo schita*, Nauk. dumka, Kyiv, Ukraine, 154 p.
5. Volkov, A.I. and Zharskiy, I.M. (2005), *Bol'shoj himicheskij spravochnik*, Sov. shkola, Minsk, Belorussiya, 608 p.
6. Gurov, E.P. and Gurova, E.P. (1991), *Geologicheskoe stroenie i veschestvennyj sostav porod impaktnyh struktur*, Nauk. dumka, Kyiv, Ukraine, 160 p.
7. Gurov, E.P., Kolesov, G.M. and Gurova, E.P. (1986), *Meteoritica*, Vyp. 45, pp.150-155.

8. Gurov, E.P. and Permyakov, V.V. (2014), *Mineralogical Journal (Ukraine)*, Kyiv, Vol. 36 No 3, pp. 76-85.
9. Gurov, E.P., Shekhunova, S.B. and Permyakov, V.V. (2011), *Geofizicheskiy zhurnal*, Kyiv, Ukraine, Vol. 33 No 5, pp. 66-89.
10. Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. (1966), *Porodoobrazujushchie mineraly*, Mir, Moscow, Russia, 408 p.
11. Masaitis, V.L., Danilin, A.N., Mashchak, M.S., Raykhlin, A.I., Selivanovskaya, T.V. and Shadenkov, Ye.M. (1980), *Geologija astroblem*, Nedra, Leningrad, Russia, 232 p.
12. Chuhrov, F.V. (ed.) (1960), *Mineraly*, Spravochnik, Izd-vo AN SSSR, Moscow, Russia, Vol. 1, 618 p.
13. Novgorodova, M.I. (1987), *Samorodnye metally*, Znanie, Moscow, Russia, 48 p.
14. Novgorodova, M.I., Yusupov, R.G. and Sveshnikova, E.V. (1985), *Samorodnye metally v izverzhennyh gornyh porodah*, Tez. dokl. Vsesojuz. konf. "Samorodnoe 'elementoobrazovanie v 'endogennyh processah", Ch. 1, Jakut. fil. SO AN SSSR, Yakutsk, pp. 12-14.
15. Tatarintsev, V.I. (1984), *Rudnye mineraly i ih genezis v porodah vzryvnyh kol'cevyyh struktur Ukrainy*, Avtoref. dis. kand. geol.-mineral. nauk, Kyiv, Ukraine, 18 p.
16. Tatarintsev, V.I. and Tsymbal, S.N. (1985), *Vzryvnye kol'cevyje struktury schitov i platform*, Nedra, Moscow, Russia, pp. 97-134.
17. Tatarintsev, V.I., Tsymbal, S.N., Legkova, G.V., Samoylovich, L.G. and Sharkin, O.P. (1985), *Geological Journal*, Kyiv, Ukraine, Vol. 45 No 3, pp. 75-82.
18. Frondel, J. (1978), *Mineralogija Luny*, Mir, Moscow, Russia, 334 p.
19. Ames, D.E., Jonasson, I.R., Gibson, H.L. and Pope, K. (2006), *Biological Processes Associated with Impact Events*, in Cockell, C., Koeberl, C. and Gilmour, I. (eds), Springer, Berlin, pp. 21-100.
20. Ames, D.F., Kjarsgaard, I.M. and Doumas, S.L. (2003), *Geol. Surv. Canada*, 1787, CD-ROM.
21. 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.
22. Blau, P.J., Axon, H.J. and Goldstein, J.I. (1973), *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, pp. 363-374.
23. Bowen, N.L. and Schairer, J.F. (1935), *Amer. J. Sci.*, Vol. 29, pp.151-217.
24. Doehne, E. and Margolis, S.V. (1990), *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, Vol. 247, pp. 367-382.
25. El Goresy, A.(1968), *Shock metamorphism of natural materials*, in Short, B.M. and French, M.N. (eds), Mono Book Corp., Baltimore, USA, pp. 531-553.
26. Farrow, C.E.G. and Watkinson, D.H. (1997), *Can. Miner.*, Vol. 35, pp. 817-839.
27. Fregerslev, S. and Carstens, H. (1976), *Contribs Mineral. and Petrol.*, Vol. 55, pp. 256-263.
28. Grieve, R.A.F., Reny, G., Gurov, E.P. and Ryabenko, V.A. (1987), *Contribs Mineral. and Petrol.*, Vol. 96, pp. 56-62.
29. Gurov, E.P., Kelley, S.P., Koeberl, C. and Dykan, N.I. (2006), *Biological processes associated with impact events*, in Cockell, C., Koeberl, C. and Gilmour, I. (eds), Springer, Berlin, pp. 335-358.
30. Gurov, E.P., Shekhunova, S.B. and Permyakov, V.V. (2015), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 50, pp. 1139-1155.
31. McDonald, I., Koeberl, C. and Gurov, E. (2009), *Lunar and Planet. Sci. Conf.*, Abstr., Vol. 40 No 1252.
32. Naumov, M.V. (2002), *Impacts in Precambrian Shields*, in Plado, J. and Pesonen, L.J. (eds), Berlin, Springer, pp. 117-171.
33. Tuttle, O.F. and Bowen, N.L. (1958), *Geol. Soc. Amer., Mem.* No 74, 153 p.
34. Xie, Y., Hou, Z., Xu, J., Yuan, Z., Bai, G. and Li, X. (2006), *Sci. of China*, Ser. D 49, pp. 597-603.

Received 20.08.2015

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

САМОРОДНІ МЕТАЛИ В УДАРНО-РОЗПЛАВЛЕНИХ ПОРОДАХ БОВТИСЬКОЇ ІМПАКТНОЇ СТРУКТУРИ

Електронно-мікроскопічні дослідження ударно-розплавлених порід Бовтиської імпаکتної структури на Українському щиті дозволили встановити в них комплекс акцесорних самородних металів і сплавів, що утворилися на різних етапах формування потужної товщі імпаکتитів. Цинково-мідний сплав, мідисте срібло та золото у вигляді одиничних зерен знаходяться у складі розплавлених імпаکتитів нижнього горизонту товщі, які складаються з мікролітів ромбічного піроксену і польових шпатів, занурених у склувату матрицю. Локалізація цих мінералів у склуватій матриці розплавлених імпаکتитів, що не несуть слідів вторинних змін, свідчить про їх кристалізацію в остаточному ударному розплаві до його затвердіння. Самородні метали: мідь, платина, купроплатина, срібло та залізо, розповсюджені в ударно-розплавлених породах верхнього горизонту, що зазнали інтенсивної хлоритизації. Форма кристалізації самородних металів у вигляді мікропрожилок та їх тісний зв'язок із агрегатами хлориту свідчать про утворення цих мінералів під час вторинних змін імпаکتитів після їх остаточного затвердіння. Прояви акцесорної мінералізації самородної платини, купроплатини, міді та срібла в ударно-розплавлених

породах кислого складу з вмістом SiO_2 близько 68 ваг. %, ймовірно, пов'язані з наявністю домішки в породах речовини астероїда, який утворив Бовтиську структуру.

Ключові слова: імпактна структура, ударно-розплавлена порода, самородна мідь, самородна платина, мідисте срібло, хлоритизація.

E.P. Gurov, V.V. Permyakov

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

NATIVE METALS IN IMPACT MELT ROCKS OF THE BOLTYSH IMPACT STRUCTURE

The complex of accessory native metals and alloys was determined by the electron microprobe analyses of impact melt rocks of the Boltysh structure in the Ukrainian Shield. Our study established a variety of minerals represented by native metals, alloys, oxides, sulfides, phosphates, and silicates, formed during several stages of cooling and solidification of the thick impact melt sheet. Two main units of impact melt rocks can be distinguished in the impact melt sheet of the Boltysh structure. Hialine impact melt rocks with a glassy matrix and microliths of feldspars and orthopyroxene compose the lower unit of the melt sheet at the intervals 792–657 m in borehole No 11475 and 736–653 m in borehole No 50. Microcrystalline impact melt rocks with microliths of feldspars and completely chloritized pyroxene form the upper unit of the impact melt sheet at intervals from 657 m to its surface at 573 m in borehole No 11475 and from 653 to 594 m in borehole No 50. The accessory mineralization of zinc-copper alloy (natural brass) with zinc content 35.8–37.5 wt. %, copper-silver alloy with copper content 26.8 wt. %, and native gold occurs in impact melt rocks of the lower unit of the sheet that do not contain any traces of secondary alteration process. Isometric, oval, or drop-like shapes of these minerals and occurrence in glassy matrix of impact melt rocks without any traces of alteration evidence for their crystallization in a residual melt before its solidification. Formation of brass with zinc contents of about 35–40 wt. % takes place at temperatures of about 900 °C, and crystallization of native gold occurs at temperatures of about 1032 °C, while temperatures of solidification of glassy matrix is estimated of about 780 °C. Native metals: copper, platinum, cuproplatinum, silver and iron were discovered in hydrothermally altered impact melt rocks of the upper unit of the sheet that was undergo to chloritization. The shapes of native metals in form of microveins and close association with chlorite evidence for their crystallization after the complete solidification of impact melt by the hydrothermal alteration. Native copper, platinum, cuproplatinum, silver, and iron occur within the upper unit of the hydrothermally altered impact melt rocks of the sheet in the form of veins and vein-like aggregates in the matrix and at the margins of chlorite grains. Such shapes of these native metals evidence for their origin after the complete solidification of impact melt during hydrothermal alteration. Temperatures of this process are estimated in the range of 300–350 °C. Mineralization of native platinum, cuproplatinum, copper, silver and iron in impact melt rocks of siliceous composition with SiO_2 content of 68 wt. % seems to be uncommon and is probably caused by admixture of a material of the asteroid that formed the Boltysh impact structure. Geochemical investigations of impact melt rocks of the Boltysh structure showed their low enrichment in some platinum group elements, nickel, chromium and some others.

Keywords: impact structure, impact melt rock, native copper, native platinum, cuprous silver, chloritization.