

УДК 549.3 : 523.681.8

Е.П. Гуров, В.В. Пермяков

Институт геологических наук НАН Украины
01601, г. Киев, Украина, ул. Олеся Гончара, 55-б
E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com; 0673866227@ukr.net

ЦИРКОН И БАДДЕЛЕИТ В УДАРНО-РАСПЛАВЛЕННЫХ ПОРОДАХ БОЛТЫШСКОЙ СТРУКТУРЫ

В составе ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры циркон — единственный аксессуарный минерал, сохранившийся при ударном плавлении гранитоидных пород мишени кратера. Циркон в расплавленных импактиках содержит информацию о воздействии на него двух важнейших процессов при кратерообразовании. Во-первых, морфология и строение зерен циркона свидетельствуют об их интенсивной резорбции высокотемпературным ударным расплавом от образования оплавленных эллипсоидальных и изометрических зерен до интенсивно разрезанных и скелетных форм. Во-вторых, зерна циркона несут информацию об испытанном ими ударном давлении до попадания в импактный расплав. Наблюдаются проявления ударного метаморфизма в виде планарных микроструктур, образовавшихся в условиях наиболее низких ударных нагрузок. При более высоком ударном давлении образуются диаплектовые цирконовые стекла, которые в ударном расплаве подвергаются раскristаллизации в микроагрегаты циркона. Цирконовые стекла плавления с газовыми вакуолями представляют собой продукты изменения циркона под действием наиболее высоких ударного давления и постударной температуры. Идиоморфные кристаллиты бадделеита в ударно-расплавленных породах Болтышской структуры являются продуктами кристаллизации в высокотемпературном расплаве.

Ключевые слова: импактная структура, циркон, бадделеит, ударный метаморфизм.

Введение. Доказательство ударного происхождения подавляющего большинства импактных структур на поверхности Земли основано на установлении в составе слагающих их пород и минералов признаков ударного метаморфизма. До настоящего времени важнейшим минералом, содержащим уникальные признаки ударного метаморфизма и используемым для подтверждения ударного происхождения кратеров и астроблем, служит кварц. Именно проявления ударного метаморфизма кварца, возникающие при кратерообразовании и не образующиеся ни при каких других процессах на поверхности Земли, позволили использовать этот минерал при поисках, диагностике и изучении структур ударного происхождения [12, 18, 19]. За исключением метеоритных кратеров диаметром от 1,2 км и менее, в которых сохранились остатки вещества ударника, более 90 % достоверных земных импактных структур диагностированы в результате установления в сос-

таве слагающих их пород ударно-метаморфизованного кварца.

Начиная с 1990-х гг. в ходе изучения импактных структур и расшифровки ударных процессов большое внимание привлекает циркон, проявления ударного метаморфизма которого уникальны и не формируются в результате эндогенных процессов [6, 20, 21]. Важно, что циркон сохраняет признаки ударных воздействий при таких высоких значениях температуры, при которых не сохраняются проявления ударного метаморфизма кварца до его плавления.

Объектом исследования для данной работы послужили циркон и бадделеит из толщи расплавленных импактитов Болтышской структуры.

Болтышская структура диаметром 24 км и глубиной до 1 км расположена в центральной части Украинского щита. Под толщей заполняющих структуру посткратерных осадков мощностью до 550 м находится кольцеобразная залежь ударно-расплавленных пород мощностью до 219 м, окружающая центральное поднятие.

© Е.П. ГУРОВ, В.В. ПЕРМЯКОВ, 2016

Основные особенности импактной структуры, а также строения, состава, минералогии и петрографии залежи расплавленных импактитов охарактеризованы в многочисленных работах [1—4, 13]. Нами впервые проведено детальное электронно-микроскопическое изучение распространения, состава и строения акцессорных минералов расплавленных импактитов, образовавшихся на разных стадиях формирования их толщи [14]. Особое внимание уделено исследованиям циркона и его ударного метаморфизма. Циркон — это единственный акцессорный минерал расплавленных импактитов, унаследованный из гранитоидов мишени кратера. Воздействие на этот минерал вмещающей мощной толщи высокотемпературного ударного расплава определило некоторые особенности его сохранности в породах Болтышской структуры, которые отличаются от сохранности циркона и следов его ударного метаморфизма из многих импактных структур, в том числе кратеров Рис, Попигаи, Ксиюань и некоторых других [7, 9, 21].

Материалы и методы исследований. Материалом для исследований настоящей работы послужили 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 по всему разрезу толщи, включая 15 образцов из скв. № 50 и 9 — скв. № 11475. Изученные образцы представляют все разновидности ударно-расплавленных пород: от расплавленных импактитов со свежей стекловатой матрицей до хлоритизированных пород с криптокристаллической матрицей.

Изучение строения и состава акцессорных минералов выполнено 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 силиконовым детектором (*ADD*) и волнового дисперсионного спектрометра (ВДС) *INCA WAVE 500* с программным обеспечением. Электронно-микроскопические исследования проведены в фазоконтрастном режиме отраженных электронов (*BSEI*). Рентгеновский микроанализ проведен при ускоряющем на-

пряжении 20 кэВ и токе пучка 1—1,5 нА при анализах на ЭДС и 25—30 нА — при использовании ВДС.

Результаты. Циркон распространен по всей толще ударно-расплавленных пород в виде редких зерен, форма которых свидетельствует об интенсивной резорбции минерала ударным расплавом. Все исследованные зерна циркона в импактитах — это реликтовые образования, источником которых послужили гранитоиды мишени кратера.

Изучение морфологии и строения акцессорного циркона в составе толщи ударно-расплавленных пород позволяет выделить два главных фактора его преобразования: 1 — воздействие ударной волны на минерал до его попадания в ударный расплав, 2 — воздействие высокотемпературного ударного расплава на захваченные зерна минерала. Таким образом, зерна циркона в расплавленных импактитах несут информацию об этих двух последовательных процессах, следы которых различимы в изученных зернах минерала. Воздействие высокой температуры расплава отчетливо выражено в морфологических особенностях циркона и наблюдается в преобладающем большинстве его зерен в ударно-расплавленных породах Болтышского кратера. В то же время степень ударного метаморфизма различна для каждого индивидуального зерна и частично изменена под воздействием высокой температуры ударного расплава. Форма выделений циркона в ударно-расплавленных породах Болтышской структуры определена процессами его частичной резорбции. Единичные угловатые обломочные зерна минерала без следов растворения (рис. 1, *a*), а также частично сохраняющие призматическую форму кристаллы циркона (рис. 1, *b*) наблюдаются только в пределах эндоконтактной зоны толщи ударно-расплавленных пород на расстоянии до 10—15 м от ее контакта с подстилающими брекчиями и зювитами. Необходимо отметить, что в пределах этой зоны сохраняются также зерна кварца с планарными элементами, в то время как далее от контакта во всей внутренней части толщи ударно-расплавленных пород распространены зерна переплавленного кварца с шариковыми (*ballen*) структурами. Наиболее распространенная форма циркона в пределах всей толщи расплавленных импактитов представлена изометрическими или слабоудлиненными эллипсоидальными зернами с овальными сечениями (рис. 1, *c*),



Рис. 1. Степень сохранности циркона в расплавных импактитах Болтышской структуры: *a* — обломочное зерно циркона без следов резорбции из эндоконтактной зоны толщи ударно-расплавленных пород (скв. № 50, гл. 734 м); *b* — слабрезорбированное зерно циркона, сохраняющее призматическую форму исходного кристалла (скв. № 50, гл. 734 м); *c* — характерная для ударно-расплавленных пород Болтышской структуры эллипсоидальная форма зерна циркона (скв. № 11475, гл. 778 м); *d* — реликты зерна циркона, интенсивно разъеденного импактным расплавом (скв. № 50, гл. 650 м)

Fig. 1. Preservation stage of zircon from impact melt rocks of the Boltysch structure: *a* — clastic grain of zircon without any traces of a resorption from the endocontact zone of impact melt sheet (borehole No 50, depth 734 m); *b* — weakly resorbed zircon grain that preserved prismatic shape of initial crystal (borehole No 50, depth 734 m); *c* — characteristic ellipsoidal shape of zircon grain from impact melt rock of the Boltysch structure (borehole No 11475, depth 778 m); *d* — relics of zircon grain, intensively resorbed by impact melt (borehole No 50, depth 650 m)

размер которых составляет от 5 до 20 мкм и достигает 50 мкм по длинной оси у наибольших выделений. При более интенсивной резорбции зерен циркона образуются его проплавленные выделения с глубокими заливами, заполненными матрицей (рис. 1, *d*). Установление интенсивно резорбированных зерен циркона позволяет предполагать полное растворение ударным расплавом некоторой части попавших в него кристаллов минерала, в первую очередь зерен высоких ступеней ударного метаморфизма.

Степень сохранности кристаллической формы циркона в расплавных импактитах Болтышской структуры значительно уступает сохранности циркона в импактитах многих кратеров, в том числе Попигаевского, Чиксулуб, Рис и других, где зерна ударно-метаморфизованного циркона часто сохраняют кристаллическую форму минерала без следов растворения [8, 9, 20]. Эти особенности морфологии циркона из Болтышской структуры связаны с продолжительным и интенсивным воздействием ударного расплава мощной медленно остывающей его толщи.

Изменения циркона в условиях прогрессивного ударного метаморфизма выражены в образовании планарных микроструктур, замещении реидитом — плотной фазой $ZrSiO_4$, обра-

зовании диаплектового стекла и его раскристаллизации, твердофазном распаде минерала с образованием бадделеита и кремнезема, и ударном плавлении [8, 9, 15, 16, 20]. Согласно оценкам в работах [10, 20], образование планарных микроструктур в цирконе происходит в условиях I—III ступеней ударного метаморфизма (по классификации Д. Штёффлера [19]) при ударном давлении от 20 до 60 ГПа. Следы воздействия наиболее низкого ударного давления, зафиксированные в цирконе, выражены в появлении одной или нескольких систем планарных микроструктур, которые представлены планарными трещинами, полисинтетическими двойниками или параллельно ориентированными ламелями диаплектового стекла [10, 16, 20].

В зернах циркона из ударно-расплавленных пород Болтышского кратера планарные микроструктуры представлены в виде проплавленных и заполненных стеклом систем параллельных сближенных ламелей (рис. 2, *a*). Такой характер планарных микроструктур позволяет предполагать их исходный состав в виде пластин, выполненных аморфной фазой $ZrSiO_4$, которая легче подвергается растворению ударным расплавом.

Согласно экспериментальным данным [11, 16], одновременно с образованием планарных

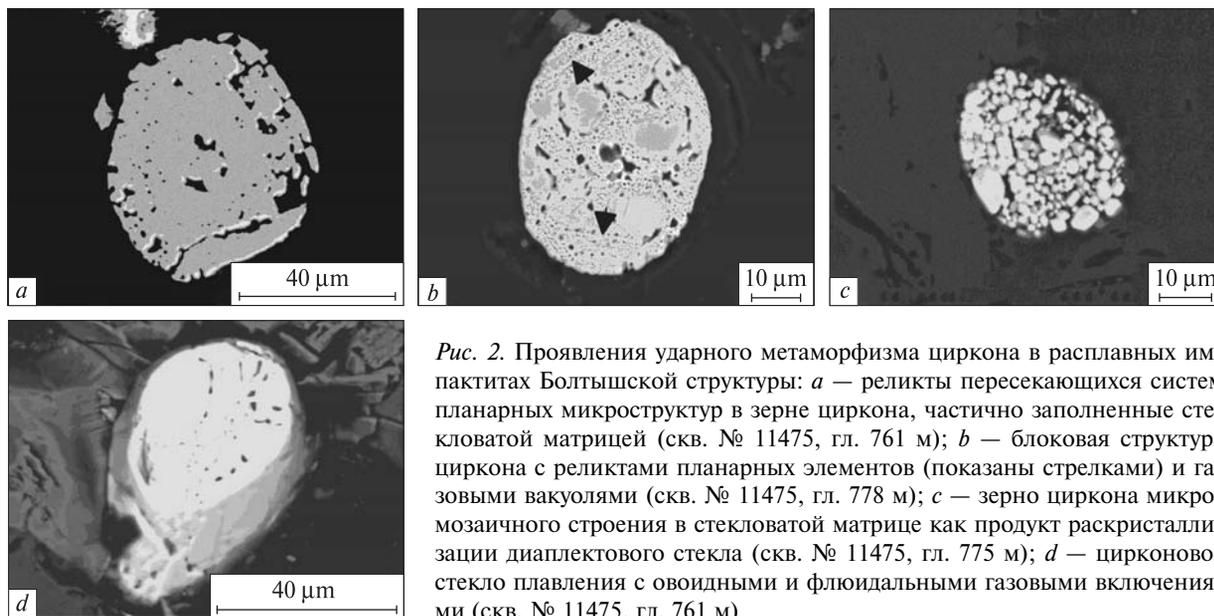


Рис. 2. Проявления ударного метаморфизма циркона в расплавных импактитах Болтышской структуры: *a* — реликты пересекающихся систем планарных микроструктур в зерне циркона, частично заполненные стекловатой матрицей (скв. № 11475, гл. 761 м); *b* — блоковая структура циркона с реликтами планарных элементов (показаны стрелками) и газовыми вакуолями (скв. № 11475, гл. 778 м); *c* — зерно циркона микромозаичного строения в стекловатой матрице как продукт раскристаллизации диаплектового стекла (скв. № 11475, гл. 775 м); *d* — цирконовое стекло плавления с оvoidными и флюидальными газовыми включениями (скв. № 11475, гл. 761 м)

Fig. 2. Manifestations of shock metamorphism of zircon from impact melt rocks of the Boltys structure: *a* — relics of intersected systems of planar microstructures in zircon grain are partially filled by a glassy matrix (borehole No 11475, depth 761 m); *b* — block structure of zircon grain with relics of planar microstructures (shown by arrows) and gas bubbles (borehole No 11475, depth 778 m); *c* — micromosaic grain of zircon in a glassy matrix as a product of recrystallization of diaplectic glass (borehole No 11475, depth 775 m); *d* — melted zircon glass with fluidal gas bubbles (borehole No 11475, depth 761 m)

микроструктур в интервале ударного давления от 20—30 до 52—60 ГПа происходит твердофазный переход циркона в реидит — плотную тетрагональную форму $ZrSiO_4$ со структурой шеелитового типа, плотность которой на 11 % выше плотности циркона. Впервые эта фаза $ZrSiO_4$ была синтезирована А.Ф. Реидом и А.Е. Рингвудом [17], позже установлена в ряде импактных структур. Реидит — устойчивая фаза в температурном интервале от 1000 до 1200 °С, при более высокой температуре происходит его обратный переход в циркон с увеличением объема на 11 % [15, 16]. При изучении ударно-метаморфизованного циркона из расплавных импактитов Болтышского кратера установлено, что реидит в его составе не сохранился вследствие его обратного перехода в циркон в медленно остывающей толще расплавных импактитов, исходная температура которых превышала 1500—1700 °С [14]. В то же время продуктом отжига реидита могут быть зерна циркона с блоковыми структурами, в которых сохраняются декорированные газовыми микровакуолями плоскостные системы (рис. 2, *b*). Эти особенности строения зерен циркона свидетельствуют об увеличении их объема в результате обратного перехода реидита в циркон при отжиге. Как и в Болтышской импакт-

ной структуре, реидит или его реликты не сохраняются в цирконах из ударно-расплавленных пород Попигайского кратера, а также в цирконах из мощной толщи зювитов кратера Чиксулуб [20, 21]. Однако эта плотная фаза $ZrSiO_4$ сохраняется в составе ударно-метаморфизованного циркона в условиях закалки, например, в составе стекол из зювитов кратера Рис [20], а также в зювитах кратера Ксиюань, где реидит образует плоскостные системы в цирконе из обломков пород II ступени ударного метаморфизма [7].

При ударном метаморфизме III ступени (по классификации Д. Штёффлера [19]), циркон полностью превращается в диаплектовое стекло, выделения которого сохраняют исходную форму его кристаллов. В ударных расплавах диаплектовое стекло подвергается раскристаллизации с образованием микрокристаллических агрегатов циркона [20].

В Болтышском кратере в составе высокотемпературного ударного расплава диаплектовое цирконовое стекло подверглось раскристаллизации с образованием кристаллитов циркона размером от 2 до 5—7 мкм, агрегаты которых сохраняют исходную форму зерен (рис. 2, *c*). Процессы раскристаллизации превращенных в диаплектовое стекло кристаллов

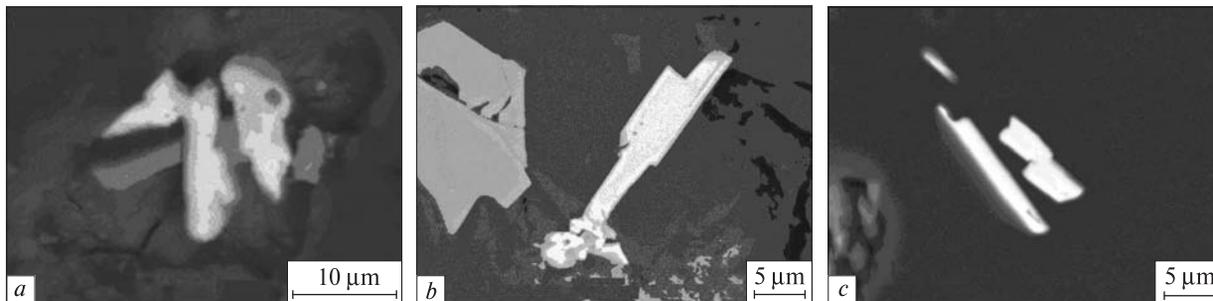


Рис. 3. Бадделеит из расплавных импактитов Болтышской структуры: *a* — агрегат зерен бадделеита, предположительно образовавшийся в результате твердофазного распада циркона (скв. № 50, гл. 603 м); *b* — призматический кристалл бадделеита в стекловатой матрице. В левой части изображения микролит гиперстена (скв. № 11475, гл. 694 м); *c* — таблитчатые кристаллиты бадделеита в криптокристаллической матрице (скв. № 50, гл. 650 м)

Fig. 3. Baddeleyite from impact melt rocks of the Boltys structure: *a* — aggregate of baddeleyite grains formed probably by decomposition of zircon (borehole No 50, depth 603 m); *b* — prismatic crystal of baddeleyite in a glassy matrix. Crystal of hypersthene (grey) in the left part of the image (borehole No 11475, depth 694 m); *c* — tabular crystallites of baddeleyite in a cryptocrystalline matrix (borehole No 50, depth 650 m)

и зерен циркона описаны в ряде импактных структур, в том числе Попигайской и Чиксулуб [20, 21].

В условиях IV ступени ударного метаморфизма, охватывающего интервал постударных температур от 1600 до 2600 °С [19], происходят твердофазный распад циркона на бадделеит и кремнезем при температуре 1750–1900 °С и ударное плавление циркона при более высокой температуре [7, 8, 20]. При изучении ударного метаморфизма циркона из импактных кратеров Рис, Попигайский, Чиксулуб и некоторых других было установлено образование выделений бадделеита неправильной или червеобразной формы микронной размерности в

периферических зонах его кристаллов, в то время как в их центральных частях сохраняется циркон без признаков распада. В редких случаях, в том числе в кратере Рис, наблюдаются продукты полного твердофазного замещения циркона бадделеитом и кремнеземом: агрегаты зерен бадделеита размером 0,7–2,0 мкм погружены в стекловатую матрицу, но сохраняют очертания исходных кристаллов циркона [8, 20]. В ударно-расплавленных породах Болтышской структуры установлены сложные агрегаты бадделеита, состоящие из срастаний его удлиненных зерен неправильной формы, которые рассматриваются как вероятный результат твердофазного распада циркона (рис. 3, *a*).

При постударных температурах выше 1900 °С происходит плавление циркона. В импактиках Болтышской структуры испытавшие плавление выделения циркона наблюдаются в виде зерен изометрической, неправильной, иногда амебообразной формы со следами флюидального течения, которое подчеркивается изогнутыми газовыми вакуолями — следами дегазации расплава $ZrSiO_4$ (рис. 2, *d*). В импактных структурах Чиксулуб и Попигайской стекла плавления циркона в виде изометрических зерен неправильной формы состоят из однородного стекла с многочисленными пузырьками субмикронной и микронной размерности [20].

Состав циркона из расплавных импактитов свидетельствует о низком содержании в нем элементов-примесей (таблица, ан. 8, 4, 9). Со-

Микрозондовые анализы циркона (ан. 8, 4, 9)

и бадделеита (ан. 25, 6, 1) из ударно-расплавленных пород Болтышской структуры

Electron microprobe analyses of zircon (analyses 8, 4, 9) and baddeleyite (analyses 25, 6, 1) from impact melt rocks of the Boltys structure

Номер скважины	50	11475	11475	50	50	50
Интервал, м	650	761	778	603	650	652
Номер анализа	8	4	9	25	6	1
ZrO ₂	69,66	69,74	69,70	94,58	94,68	93,92
HfO ₂	—	—	0,11	0,51	1,21	1,32
SiO ₂	30,05	30,82	30,78	—	2,72	2,67
TiO ₂	—	—	—	1,95	1,22	1,33
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	0,77
Fe ₂ O ₃	—	—	—	1,39	0,80	1,17
Сумма	99,71	100,56	100,59	98,43	100,63	101,18

держание гафния в минерале ниже предела чувствительности метода и только в составе единичных зерен достигает 0,15 мас. % HfO_2 . В составе изученных зерен минерала отмечается дефицит кремния относительно циркония с отношением их атомных количеств около 0,92 : 1,0.

В расплавных импактитах Болтышской структуры распространены редкие выделения бадделеита, представленные идиоморфными длиннопризматическими или таблитчатыми кристаллами длиной от 5 до 20 мкм (рис. 3, *b*, *c*). В одном случае наблюдался крестообразный двойник бадделеита в сростании с ильменитом. Изученные кристаллы бадделеита не обнаруживают пространственной связи с цирконом и не содержат его реликтов. Идиоморфная форма кристаллитов бадделеита и их расположение в матрице расплавных импактитов позволяют предполагать их кристаллизацию из расплава при температуре, превышающей температуру твердофазного распада циркона на бадделеит и кремнезем [14]. Согласно данным [5], температура кристаллизации бадделеита в расплавах составляет от 2690 до 3000 °С. Состав бадделеита представлен в таблице. Содержание ZrO_2 в нем составляет около 94–95 мас. %, а наиболее распространенными примесями в составе минерала оказались HfO_2 и TiO_2 — до 2 мас. %, а также Fe_2O_3 (до 1,4 мас. %) и SiO_2 (до 2,7 мас. %). Высокое содержание элементов-примесей в бадделеите, в особенности гафния, связано с высокотемпературными условиями его формирования и доказывает его кристаллизацию из расплава без непосредственной связи с расплавленными зёрнами циркона.

Необходимо отметить, что идиоморфные кристаллы бадделеита не наблюдались в расплавных импактитах ни одного из кратеров, в которых проводилось детальное изучение циркона и продуктов его ударного метаморфизма [6, 8, 20, 21].

Заключение. Таким образом, изучение циркона и бадделеита из расплавных импактитов Болтышской структуры позволило установить некоторые особенности их строения, следов воздействия ударного расплава или, в случае бадделеита, его кристаллизации.

В составе ударно-расплавленных пород Болтышской импактной структуры акцессорный циркон представлен реликтовыми зёрнами, унаследованными из гранитоидных пород ми-

шени. Главные особенности морфологии выделений циркона из ударно-расплавленных пород Болтышской структуры связаны с их интенсивной резорбцией вмещающим расплавом с образованием эллипсоидальных или изометрических зерен, или интенсивно проплавленных скелетных образований.

Необходимо отметить более интенсивное термическое воздействие ударного расплава на зёрна циркона в Болтышской структуре по сравнению не только с кристаллами минерала в закаленных стеклах кратеров Рис, Аэллул и Ксиюань [7, 9], но и с сохраняющими кристаллическую форму включениями циркона в ударно-расплавленных породах Попигайского кратера и в мощной толще зювитов импактной структуры Чиксулуб [20, 21]. Эти особенности морфологии выделений циркона в Болтышской структуре связаны с более интенсивным и длительным термическим воздействием на них ударного расплава в его медленно остывающей толще, мощность которой превышает 200 м.

Зёрна циркона в расплавных импактитах Болтышской структуры сохраняют следы ударного воздействия, образовавшиеся под действием ударной волны до их попадания в расплав.

Системы планарных микроструктур в виде проплавленных вмещающим расплавом параллельных зон свидетельствуют об ударном метаморфизме минерала в I–III ступенях, по классификации [19]. Следы образующегося в этих условиях реидита — плотной фазы ZrSiO_4 — в ударно-метаморфизованном цирконе из импактных пород Болтышской структуры не были установлены в связи с его обратным переходом в циркон при температуре расплава выше 1200 °С.

В то же время зёрна циркона с блоковым строением, содержащие плоскостные структуры и газовые микровакуоли, являются вероятными продуктами отжига реидита в высокотемпературном ударном расплаве. К IV ступени ударного метаморфизма отнесены аморфизированные зёрна циркона с многочисленными микровакуолями, представляющие собой продукты застывания расплава ZrSiO_4 со следами дегазации.

В расплавных импактитах Болтышской структуры установлены единичные идиоморфные кристаллы бадделеита. Их совершенная кристаллическая форма, размер выделений до 10–20 мкм и расположение в матрице ударно-

расплавленных пород свидетельствуют об образовании минерала из расплава при температуре более 1900 °С.

Эти особенности циркона и бадделеита Болтышской структуры отличают их от одноимен-

ных минералов в породах многих импактных структур, в том числе кратеров Чиксулуб, Попигайский и Рис, где морфология кристаллов циркона и проявления в них ударного метаморфизма сохранены полнее [20, 21].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вальтер А.А., Рябенко В.А. Взрывные кратеры Украинского щита. — Киев : Наук. думка, 1977. — 155 с.
2. Гуров Е.П., Гожик П.Ф. Импактное кратерообразование в истории Земли. — Киев, 2006. — 217 с.
3. Гуров Е.П., Гурова Е.П. Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. — Киев : Наук. думка, 1991. — 160 с.
4. 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.
5. Минералы: Т. 2, вып. 2. Простые окислы / Отв. ред. В.Ф. Чухров, Э.М. Бонштедт-Куплетская. — М. : Наука, 1965. — 342 с.
6. Bohor B.F., Betterton W.J., Krogh T.E. Impact shocked zircons: discovery of shock-induced textures reflecting increasing degrees of shock metamorphism // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 1993. — **119**. — P. 419—424.
7. Chen M., Yin F., Li X., Xie X., Xiao W., Tan D. Natural occurrence of reidite in the Xiuyan crater of China // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2013. — **48**. — P. 796—805.
8. El Goresy A. Baddeleyite and its significance in impact glasses // *J. Geophys. Res.* — 1965. — **70**. — P. 3453—3456.
9. 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.
10. Erickson T.M., Cavosie A.J., Moser D.E., Barker I.R., Radovan H.A. Correlating planar microstructures in shocked zircon from the Vredefort Dome at the multiple scales: Crystallographic modeling, external and internal imaging, and EBSD structural analysis // *Amer. Miner.* — 2013. — **98**. — P. 53—65.
11. Fiske P.S., Nellis W.J., Sinha A.K. Shock-induced phase transitions of ZrSiO₄, reversion kinetics, and implications for terrestrial impact craters // *EOS Transactions, Amer. Geophys. Union.* — 1994. — **75**. — P. 416—417.
12. French B.M. Traces of catastrophe: A handbook of shock metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. — Houston : Lunar and Planet. Inst., 1998. — 120 p. — (Contrib. **954**).
13. Grieve R.A.F., Reni G., Gurov E.P., Ryabenko V.A. The melt rocks of the Boltys impact crater, Ukraine, USSR // *Contribs Mineral. and Petrol.* — 1987. — **96**. — P. 56—62.
14. Gurov E.P., Shekhunova S.B., Permyakov V.V. Accessory and opaque minerals in impact melt rocks of the Boltys structure, Ukraine // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2015. — **50**. — P. 1139—1155.
15. Kusaba K., Syono Y., Kikuchi M., Fukuoka K. Shock behavior of zircon: phase transition to scheelite structure and decomposition // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 1985. — **72**. — P. 433—439.
16. Leroux H., Reimold W.U., Koeberl C., Hornemann U., Doukhan J.-C. Experimental shock deformation in zircon: a transmission electron microscopic study // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 1999. — **169**. — P. 291—301.
17. Reid A.F., Ringwood A.E. Newly observed high pressure transformations in Mn₃O₄, CaAl₂O₄, and ZrSiO₄ // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 1969. — **6**. — P. 205—208.
18. *Shock metamorphism of natural materials* / Eds. B.M. French, N.M. Short. — Baltimore, USA : Mono Book Corp., 1968. — 644 p.
19. Stöffler D. Progressive metamorphism and classification of shocked and brecciated crystalline rocks at impact craters // *J. Geophys. Res.* — 1971. — **76**. — P. 5541—5551.
20. Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R.T., Stöffler D. Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters // *Meteoritics and Planet. Sci.* — 2006. — **41**. — P. 433—454.
21. Wittmann A., Stöffler D., Schmitt R.T., Tagle R., Kenkmann T., Hecht L. Zircon as a shock indicator in impactites of drill core Yaxcopoil-1, Chixculub impact structure, Mexico // *Lunar and Planet. Sci. Conf. 35th (March 15—19).* — 2004. — #1742. — [Электрон. ресурс]. — Режим доступа : <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/sess17.pdf>

Поступила 25.08.2015

REFERENCES

1. Val'ter, A.A. and Ryabenko, V.A. (1977), *Vzryvnye craters Ukrainського shhita*, Naukova dumka, Kiev, Ukraine, 155 p.
2. Gurov, E.P. and Gozhik, P.F. (2006), *Impactnoe crateroobrazovanie v istorii Zemli*, Kiev, Ukraine, 217 p.
3. Gurov, E.P. and Gurova, E.P. (1991), *Geologicheskoe stroenie i veshestvennyy sostav porod impactnykh structur*, Naukova dumka, Kiev, Ukraine, 160 p.
4. Masaitis, V.L., Danilin, A.N., Mashchak, M.S., Raikhlina, A.I., Selivanovskaya, T.V. and Shadenkov, E.V. (1980), *Geologiya astroblemy*, Nedra, Leningrad, Russia, 232 p.
5. Chuhrov, F.V. and Bonschtedt-Kupletskaya, E.M. (eds) (1965), *Mineraly*, Spravochnik, Nauka, Moskva, Russia, Vol. II, Vyp. II, 342 p.
6. Bohor, B.F., Betterton, W.J. and Krogh, T.E. (1993), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 119, pp. 419-424.
7. Chen, M., Yin, F., Li, X., Xie, X., Xiao, W. and Tan, D. (2013), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 48, pp. 796-805.
8. El Goresy, A. (1965), *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, pp. 3453-3456.
9. El Goresy, A. (1968), *Shock metamorphism of natural materials*, in French, B.W. and Short, N.M. (eds), Mono Book Corp., Baltimore, USA, pp. 531-553.
10. Erickson, T.M., Cavosie, A.J., Moser, D.E., Barker, I.R. and Radovan, H.A. (2013), *Amer. Miner.*, Vol. 98, pp. 53-65.
11. Fiske, P.S., Nellis, W.J. and Sinha, A. (1994), *EOS Transactions, Amer. Geophys. Union.*, Vol. 75, pp. 416-417.
12. French, B.M. (1998), *Traces of catastrophe: A handbook of shock metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures.*, Contrib. 954, Lunar and Planet. Inst., Houston, USA, 120 p.
13. Grieve, R.A.F., Reni, G., Gurov, E.P. and Ryabenko, V.A. (1987), *Contribs Mineral. and Petrol.*, Vol. 96, pp. 56-62.
14. Gurov, E.P., Shekhunova, S.B. and Permyakov, V.V. (2015), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 50, pp. 1139-1155.
15. Kusaba, K., Syono, Y., Kikuchi, M. and Fukuoka, K. (1985), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 72, pp. 433-439.
16. Leroux, H., Reimold, W.U., Koeberl, C., Hornemann, U. and Doukhan, J.-C. (1999), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 169, pp. 291-301.
17. Reid, A.F. and Ringwood, A.E. (1969), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol. 6, pp. 205-208.
18. French, B.M. and Short, N.M. (eds) (1968), *Shock metamorphism of natural materials*, Mono Book Corp., Baltimore, USA, 644 p.
19. Stöffler, D. (1971), *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, pp. 5541-5551.
20. Wittmann, A., Kenkmann, T., Schmitt, R.T. and Stöffler, D. (2006), *Meteoritics and Planet. Sci.*, Vol. 41, pp. 433-454.
21. Wittmann, A., Stöffler, D., Schmitt, R.T., Tagle, R., Kenkmann, T. and Hecht, L. (2004), *Lunar and Planet. Sci. Conf. 35th*, March 15-19, 2004, #1742, available at: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/sess17.pdf>

Received 25.08.2015

Є.П. Гуров, В.В. Пермяков

Інститут геологічних наук НАН України
 01601, м. Київ, Україна, вул. О. Гончара, 55-6
 E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com; 0673866227@ukr.net

ЦИРКОН І БАДЕЛЕЙТ В УДАРНО-РОЗПЛАВЛЕНИХ ПОРОДАХ БОВТИСЬКОЇ СТРУКТУРИ

У складі ударно-розплавлених порід Бовтиської імпаکتної структури циркон є єдиним акцесорним мінералом, що зберігся після ударного плавлення гранітоїдних порід мішені. Циркон у розплавлених імпактітах зберігає інформацію про вплив на нього двох найважливіших процесів під час кратероутворення. По-перше, морфологія та будова його зерен свідчать про їх інтенсивну резорбцію високотемпературним ударним розплавом від утворення оплавлених еліпсоїдальних та ізометричних зерен до інтенсивно роз'їдених та скелетних утворень. По-друге, зерна циркону несуть інформацію про їх ударний метаморфізм до потрапляння в імпаکتний розплав. Спостерігаються прояви ударного метаморфізму у вигляді планарних мікроструктур, що утворилися за найнижчих значень ударного тиску. За вищих його значень утворюється діаплектове скло, яке в ударному розплаві піддається розкристалізації з формуванням мікроагрегатів циркону. Цирконове скло плавлення з газовими вакуолями — це продукт змінення циркону під дією найбільш високих ударного тиску та післяударної температури. Ідіоморфні кристали баделеїту у складі ударно-розплавлених порід Бовтиської структури утворились у результаті кристалізації з розплаву.

Ключові слова: імпактна структура, циркон, баделеїт, ударний метаморфізм.

Ye.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; 0673866227@ukr.net

ZIRCON AND BADDELEYITE IN IMPACT MELT ROCKS OF THE BOLTYSH STRUCTURE

Zircon is the only accessory mineral in impact melt rocks of the Boltysch structure, which had been preserved after the complete melting of the granitic target rocks of the crater basement. Zircon contains some information about influence of two main processes during the impact. First: morphology and structure of its grains witness about their intense resorption by impact melt. Second: zircon grains preserve some information about their shock metamorphism before entering into the impact melt. Crystals of zircon preserve their initial shapes only within the endomorphic zone of the melt sheet up to 10–15 m thick, while within the whole inner zone they are intensively resorbed forming ellipsoidal and skeletal grains. Shock metamorphic effects in zircon are presented by planar microstructures, origin of diaplectic glasses and shock melting. Planar microstructures in zircon were formed at the lowest shock pressures, these correspond to I–III stages of shock metamorphism of granitic rocks. Reidite, the dense phase of $ZrSiO_4$, that is stable at temperatures up to 1200 °C, was not determined in impact melt rocks of the Boltysch structure, while it was preserved in impact glasses of some impact craters. Zircon grains with a block structure and gas bubbles are the probable products of reverse transition of reidite. Diaplectic zircon glass originated at III stage of shock metamorphism and later it was recrystallized forming microaggregates of zircon. The grains of melted zircon glass with gas microvoids were formed at temperatures >1900 °C. Euhedral crystallites of baddeleyite in impact melt rocks of the Boltysch structure were formed by crystallization from impact melt.

Keywords: impact structure, zircon, baddeleyite, shock metamorphism.