

КАМЕНЕЦКАЯ ИМПАКТНАЯ СТРУКТУРА – НОВЫЙ УДАРНО-МЕТЕОРИТНЫЙ КРАТЕР НА УКРАИНСКОМ ЩИТЕ

Е.П. Гуров¹, Н.А. Николаенко², Е.А. Шевчук³, В.А. Присяжнюк⁴, А.Ю. Ямниченко⁵

(Рекомендовано акад. НАН Украины П.Ф. Гожиком)

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com
Доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.*

² *Экспедиция № 37, Казенное предприятие «Кировгеология», Кропивницкий, Украина,
E-mail: Nikola_Tesla@mail.ru
Ведущий геолог.*

³ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: hshevchuk@ukr.net
Кандидат геолого-минералогических наук.*

⁴ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: prysval@mail.ru
Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.*

⁵ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: yamnichenko@ukr.net
Младший научный сотрудник.*

Камене́цкая импактная структура представляет собой глубоко эродированный простой чашеобразный кратер, расположенный на южном склоне Украинского щита в бассейне среднего течения р. Ингул. Установление характерных проявлений ударного метаморфизма в породах структуры позволило доказать ее импактное происхождение и пересмотреть первоначальные представления о ее вулканогенной природе.

Камене́цкая структура является изометрической в плане депрессией на поверхности кристаллического фундамента диаметром 1,0-1,2 км и глубиной до 130 м. В результате эрозии к настоящему времени в кратере сохранилась нижняя часть толщи аллогенных брекчий, содержащая ударнометаморфизованные породы и минералы. Верхняя часть толщи заполняющего комплекса и толщина посткратерных осадков эродированы. Отложению перекрывающей толщи осадков предшествовала эрозия кратера и окружающей поверхности щита на глубину более 200 м. Время образования Камене́цкой структуры определяется в интервале от возраста кристаллических пород мишени, составляющего 2000-2100 млн лет, до позднемиоценового возраста осадочных образований перекрывающего комплекса. Глубокий срез кратера позволяет предполагать его древний, вероятно, палеозойский возраст. Камене́цкий кратер является восьмой структурой ударно-метеоритного происхождения на Украинском щите.

Ключевые слова: импактная структура, аллогенная брекчия, ударный метаморфизм, планарные элементы.

THE KAMENETSK IMPACT STRUKTURE – A NEW METEORITE-IMPACT CRATER IN THE UKRAINIAN SHIELD

E.P. Gurov¹, N.A. Nikolaenko², E.A. Shevchuk³, V.A. Prisyazhnyuk⁴, A.Yu. Yamnichenko⁵

(Recommended by academician of NAS of Ukraine P.F. Gozhik)

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com
Doctor of geological and mineralogical sciences, senior scientific worker.*

² *Expedition No. 37 of Municipal Company “Kirovgeologiya”, Kropivnickiy, Ukraine,
E-mail: Nikola_Tesla@mail.ru
Leading geologist.*

³ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: hshevchuk@ukr.net
Candidate of geological and mineralogical sciences.*

⁴ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: prysval@mail.ru
Candidate of geological and mineralogical sciences, senior scientific worker.*

⁵ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: yamnichenko@ukr.net
Junior researcher.*

The Kamenetsk impact structure is a deeply eroded simple bowl-shaped crater located on the southern slope of the Ukrainian Shield in the basin of the Ingul River. Determination of characteristic features of shock metamorphism in the rocks of the Kamenetsk structure proves its impact origin and refutes the idea of its endogenous nature.

Kamenetsk impact structure is an isometric depression in the surface of the crystalline basement 1.0-1.2 km in diameter and 130 m deep. The structure is eroded, and only the lower part of lithic breccias up to 60 m thick was preserved to the recent time. The upper part of crater-fill rocks and post-crater sediments are completely cut. Erosion of the crater and surrounding area to the depth more 200 m was preceded to the deposition of the overlying sediments. The time of the Kamenetsk structure formation is determined within a wide interval from the age of its crystalline target, 2000-2100 Ma, to the Late Miocene age of overlying sediments. A deep erosion of the crater bear witness about its ancient, probably, Paleozoic age. The Kamenetsk crater is the eighth impact structure in the Ukrainian Shield.

Key words: impact structure, lithic breccia, shock metamorphism, planar deformation features.

КАМ'ЯНЕЦЬКА ІМПАКТНА СТРУКТУРА – НОВИЙ УДАРНО-МЕТЕОРИТНИЙ КРАТЕР НА УКРАЇНСЬКОМУ ЩИТІ

(Рекомендовано акад. НАН України П.Ф. Гожиком)

Є.П. Гуров¹, М.А. Ніколаєнко², О.А. Шевчук³, В.А. Присяжнюк⁴, А.Ю. Ямниченко⁵

¹ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: yevgeniy.gurov@gmail.com
Доктор геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник.*

² *Експедиція No. 37, Казенне підприємство «Кіровгеологія», Кропивницький, Україна, E-mail: Nikola_Tesla@mail.ru
Провідний геолог.*

³ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: hshevchuk@ukr.net
Кандидат геолого-мінералогічних наук.*

⁴ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: prysval@mail.ru
Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник.*

⁵ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: yamnichenko@ukr.net
Молодший науковий співробітник.*

Кам'янецька імпактна структура являє собою глибоко еродований простий чашеподібний кратер, розташований на південному схилі Українського щита в басейні середньої течії р. Інгул. Встановлення характерних проявів ударного метаморфізму у породах структури дозволило довести її імпактне походження та спростувати більш ранні уявлення про її вулканогенну природу.

Кам'янецька структура утворює ізометричну в плані депресію на поверхні кристалічного фундаменту діаметром 1,0-1,2 км та глибиною до 130 м. Структура глибоко еродована, і до теперішнього часу в ній збереглася нижня частина розрізу алогенних брекчій, що містять ударнометаморфізовані породи і мінерали. Верхня частина товщі заповнюючого імпактного комплексу та товща кратерних відкладів еродовані. Відкладенню перекриваючої товщі осадів передувала ерозія кратера та поверхні щита на глибину понад 200 м. Час утворення Кам'янецької структури визначається у широкому інтервалі від віку кристалічних порід мішені, що становить 2000-2100 млн років, до пізньоміоценового віку осадових відкладів перекриваючого комплексу. Глибокий зріз кратера дозволяє припускати його древній, ймовірно, палеозойський вік. Кам'янецький кратер є восьмою структурою ударно-метеоритного походження, діагностованою на Українському щиті.

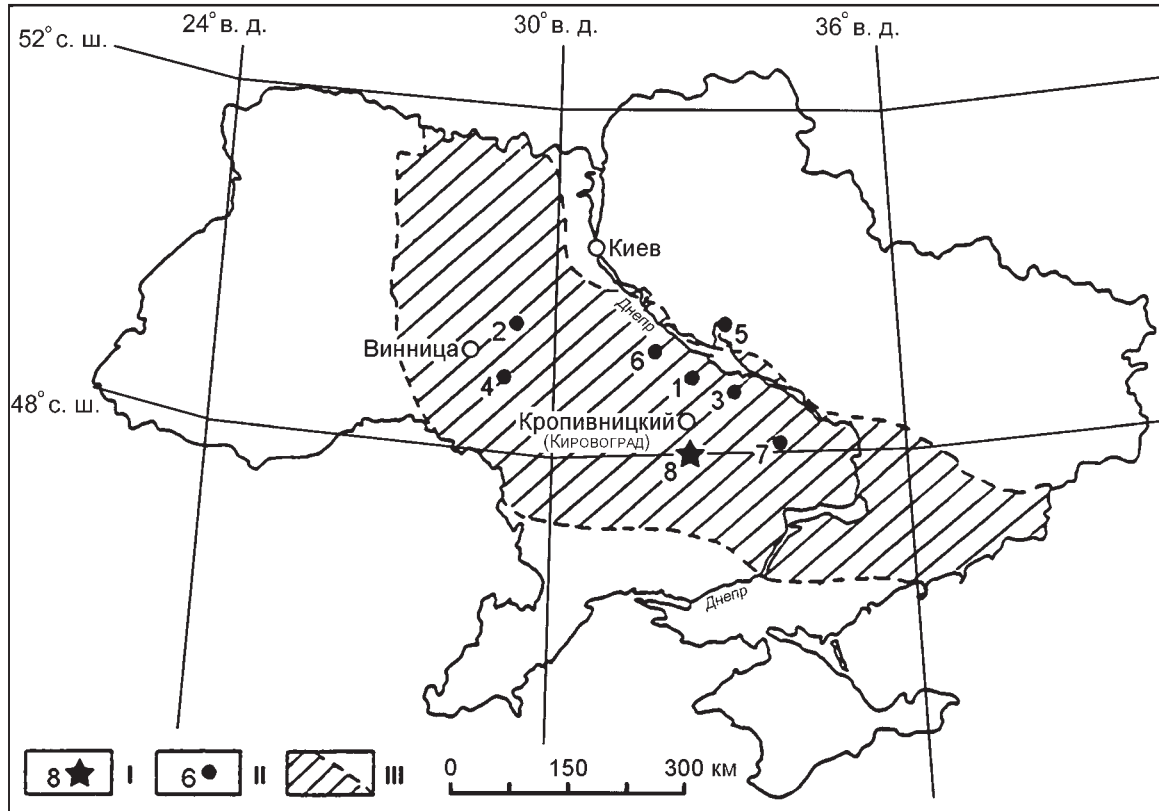
Ключові слова: імпактна структура, алогенна брекчія, ударний метаморфізм, планарні елементи.

Введение

Каменецкая импактная структура расположена на южном склоне Украинского щита (УЩ) в бассейне среднего течения р. Ингул в 95 км к югу от г. Кропивницкий (бывший Кировоград) (рис. 1). Координаты центра Каменецкой структуры: 47°46' с.ш., 32°21' в.д.

Рис. 1. Положение Каменецкой импактной структуры на УЩ I – Каменецкая структура; II – импактные структуры: 1 – Болтышская, 2 – Западная, 3 – Зеленогайская, 4 – Ильинецкая, 5 – Оболонская, 6 – Ротмистровская, 7 – Терновская; III – УЩ (по данным [Gurov et al., 1998], с изменениями)

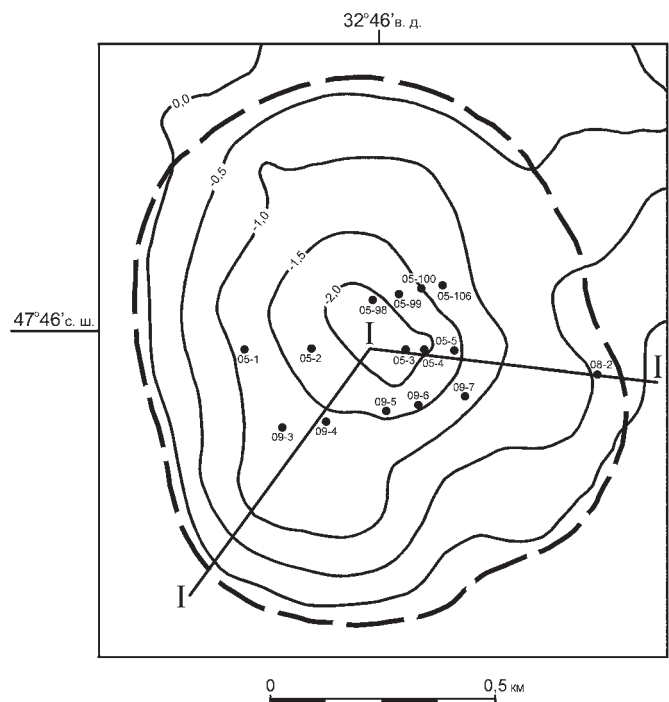
Fig. 1. Location of the Kamenetsk impact structure in the Ukrainian Shield: I – Kamenetsk impact structure; II – impact structures: 1 – Boltysk, 2 – Zapadnaya, 3 – Zeleny Gay, 4 – Ilyinets, 5 – Obolon, 6 – Rotmistrovka, 7 – Ternovka; III – Ukrainian Shield (modified after [Gurov et al., 1998])



Соответствующая Каменецкой структуре депрессия на поверхности кристаллического фундамента в южной части Кировоградского блока УЩ установлена сотрудниками экспедиции № 37 КП «Кировгеология» в 2004 г. при детальной гравirazведке масштаба 1:10 000 в виде локальной отрицательной аномалии силы тяжести интенсивностью –2 мГал (рис. 2). Бурение структуры по трем субширотным профилям скважин было проведено в

Рис. 2. Отрицательная гравитационная аномалия Каменецкой импактной структуры (сечения через 0,5 мГал). Границы структуры показаны пунктирной линией. Расположение скважин показано залитыми кружками (по данным [Романюк и др., 2006; Николаенко, 2007, 2009], с изменениями)

Fig. 2. Negative gravity field over the Kamenetsk impact structure. Cross section contours 0.5 mGal. The dotted line indicates the crater boundary. The location of the boreholes shown by bold, filled circles (modified after [Романюк и др., 2006; Николаенко, 2007, 2009])



2005 и 2009 гг. [Романюк и др., 2006; Николаенко, 2007, 2009]. В керне скважин было установлено широкое распространение брекчий, диагностированных этими исследователями как «эпикластические туфопесчаники». На основании этого П.М. Романюком с соавторами [Романюк и др., 2006] утверждалось эндогенное происхождение структуры и было предложено название «Кам'янецька ендегенна експлозивна структура», а также «Кам'янецька палеовулканічна структура» и «Кам'янецький палеовулкан». Образование структуры авторами связывалось с «проявом експлозивної магматичної діяльності в межах Кіровоградського блоку УЩ у пізньому фанерозої». В то же время в этой работе подчеркивалось сходство Каменецкой структуры с Ильинецкой, Западной, Болтышской, Ротмистровской, Оболонской и Зеленогайской импактными структурами УЩ, а также Пучеж-Катунской импактной структурой в России, ударное происхождение которых этими исследователями опровергается [Романюк и др., 2006]. Вызывает сожаление полное непонимание и неприятие авторами этой работы значения и роли ударного кратерообразования в истории развития Земли. Импактные структуры УЩ, прежде всего Болтышская, Ильинецкая и др., широко известны международному геологическому сообществу, а их характеристики начиная с 1973 г. опубликованы во многих научных публикациях как украинских, так зарубежных изданий [Масайтис и др., 1980; Gurov et al., 1998; Kelley and Gurov, 2002; Jolley et al., 2010; Jourdan et al., 2012 и др.]. Кроме того, все метеоритные кратеры Украины входят в опубликованные списки *достоверных* импактных структур на поверхности Земли [Grieve, 1987; Гуров, Гурова, 1991; Earth Impact Database, 2017].

Исходя из сходства Каменецкой структуры с импактными кратерами [Романюк и др., 2006], нами были проведены исследования пород структуры для возможного пересмотра ее генезиса и доказательства импактного образования. К началу наших исследований сохранился керн скв. 09-5, а также коллекция образцов керна скв. 05-2, 05-3, 05-4, 05-100, 09-6 и 09-7, предоставленная нам для исследований Н.А. Николаенко. Кроме того, была использована первичная документация всех скважин, пробуренных в структуре [Николаенко, 2007, 2009]. Установленные проявления ударного метаморфизма в изученных образцах пород позволили пересмотреть представления

об эндогенной природе Каменецкой структуры [Романюк и др., 2006] и доказать ее ударно-метеоритное происхождение. Для сохранения приоритета ее первооткрывателей нами предложено название *Каменецкая* импактная структура (Kamenetsk impact structure) [Gurov et al., 2017].

Строение Каменецкой импактной структуры
Каменецкая импактная структура представлена в виде депрессии изометрической формы на поверхности кристаллического фундамента УЩ. Структура перекрыта рыхлыми четвертичными отложениями, не выражена в рельефе и не фиксируется на дистанционных материалах.

Кристаллические породы мишени кратера представлены сложным комплексом биотитовых, гранат-биотитовых, пироксен-биотитовых и графит-биотитовых гнейсов чечелевской серии протерозоя с изотопным возрастом 2300-2400 млн лет и прорывающим их кировоградским комплексом биотитовых гранитов возрастом 2000-2100 млн лет [Панкратов и др., 1995].

По параметрам отрицательной гравитационной аномалии диаметр кратера составляет 1,0 км в широтном направлении и 1,2 км в меридиональном [Романюк и др., 2006]. Глубина структуры в центральной части до поверхности катаклазированных пород основания достигает 130 м (рис. 3). От центра структуры глубина неравномерно уменьшается и на расстоянии около 300 м к востоку от центра составляет 62 м (скв. 09-7), а на восточном краю кратера в скв. 08-2 катаклазированные породы фундамента вскрыты на глубине 38 м (рис. 4).

Основание кратера образуют брекчированные и катаклазированные гнейсы и граниты, пересеченные сложной системой крутопадающих жил микробрекчий мощностью от миллиметров до нескольких сантиметров (рис. 5, а, б). Блоки катаклазированных пород между зонами микробрекчий имеют мощность от сантиметров до первых десятков сантиметров. Кристаллические породы основания интенсивно катаклазированы. Под микроскопом наблюдается волнистое погасание кварца и изгибание полисинтетических двойников плагиоклаза, в биотите распространены полосы смятия. В единичных зернах кварца наблюдаются системы планарных трещин. Вниз от поверхности основания уменьшается трещиноватость каркасных силикатов, а также исчезают полосы смятия в биотите.

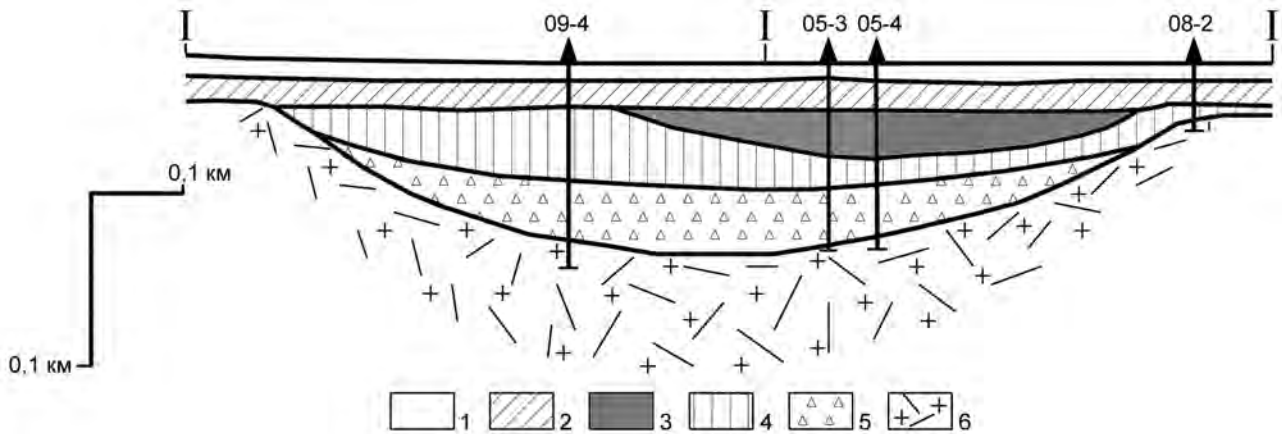


Рис. 3. Схематический разрез (I-I) по скважинам Каменецкой импактной структуры

1 – четвертичные отложения: лессы, лессовидные суглинки; 2 – миоценовые морские и прибрежно-морские отложения; 3 – бурые угли, углисто-глинистые сланцы; 4 – осадочная брекчия; 5 – аллогенная брекчия; 6 – брекчированные породы кристаллического основания

Fig. 3. Schematic cross-section (I-I) of the Kamenetsk impact structure

1 – quaternary sediments: loess, loess-like loam; 2 – marine and coastal-marine sediments of Miocene; 3 – lignites, lignite shales; 4 – sedimentary breccia; 5 – allochthonous breccia; 6 – brecciated rocks of the crystalline basement

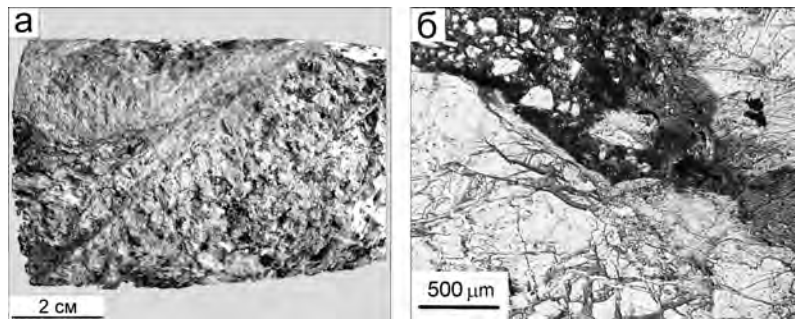
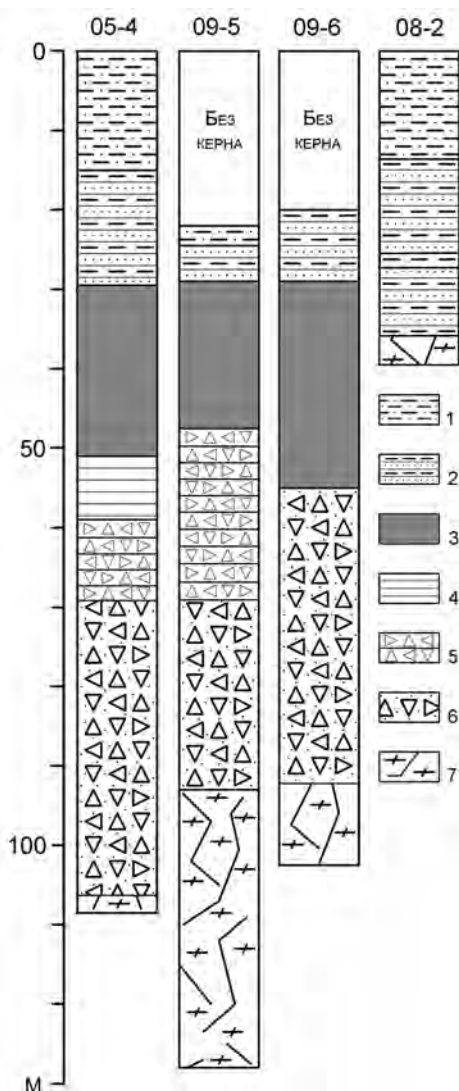


Рис. 5. а) Жилы микробрекчий (серый) в брекчированном граните кристаллического основания (скв. 09-6, 101,7 м); б) Микрофотография прожилка микробрекчий в катаклазированном граните (скв. 09-6, 96,8 м, без анализатора)

Fig. 5. a) Veins of microbreccia (grey) in brecciated granite from the crystalline basement (borehole 09-6, 97.2 m); b) Microphotograph of an veinlet of microbreccia in cataclased granite (borehole 09-6, 96.8 m, plane-polarized light)

Рис. 4. Схематические разрезы скв. 05-4, 09-5 и 09-6 в центральной части Каменецкой импактной структуры и скв. 08-2 в ее краевой восточной части

1 – четвертичные отложения: лессы, лессовидные суглинки; 2 – миоценовые морские и прибрежно-морские отложения: глины, мергели, пески; 3 – бурые угли; 4 – глинистые и углисто-глинистые сланцы; 5 – осадочная брекчия; 6 – аллогенная брекчия; 7 – брекчированные породы кристаллического основания

Fig. 4. Stratigraphic columns of boreholes 05-4, 09-5 and 09-6 in the central part of the Kamenetsk impact structure and borehole 08-2 at its eastern margin

1 – quaternary deposits: loess, loam; 2 – marine and coastal-marine sediments of Miocene; 3 – lignites; 4 – clay shales, lignite shales; 5 – sedimentary breccia; 6 – allochthonous breccia; 7 – brecciated rocks of the crystalline basement

На поверхности катаклазированных и брекчированных пород кристаллического фундамента залегает толща аллогенной литической брекчии. Общая мощность толщи составляет в центральной части структуры от 35 до 60 м и понижается до 20-22 м в ее юго-восточной части (рис. 3, 4). Толща представлена разностями пород от мелко- до крупнообломочных и глыбовых брекчий с их неравномерным распределением по разрезу толщи. Крупнообломочные и глыбовые брекчии распространены преимущественно на поверхности пород основания, к которым они образуют постепенный переход в интервале около 10 м. Преобладающую часть разреза толщи слагают брекчии с величиной обломков пород и минералов от миллиметров до сантиметров (рис. 6, а, б), содержащие отдельные глыбы и блоки пород диаметром до 1-2 м. Обломки пород представлены биотитовыми гранитами, биотитовыми, гранат-биотитовыми и биотит-пироксеновыми гнейсами. Обломки минералов сложены кварцем, полевыми шпатами и биотитом, в подчиненном количестве присутствуют гранат, пироксен, а также единичные мелкие зерна апатита, циркона и монацита. Цемент брекчий тонкообломочный и глинистый. Относительное содержание цемента и обломков в брекчии непостоянное при преобладающем содержании цемента около 50-60% от объема пород.

Обломки пород и минералов в брекчии содержат характерные проявления ударного метаморфизма, что является основанием для доказательства ударно-метеоритного происхождения структуры. Литические брекчии являются заполняющими кратер образованиями (crater-fill rocks, по [French, 1998]) импактного комплекса пород Каменецкой структуры.

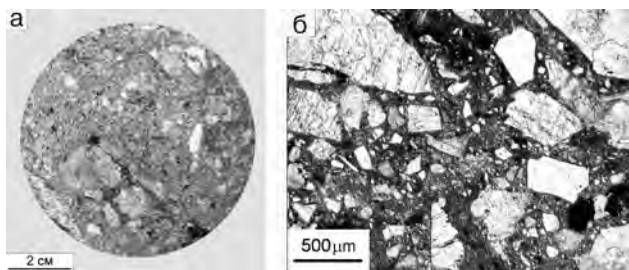


Рис. 6. а) Литическая брекчия Каменецкой структуры с обломками пород и минералов (сква. 05-4, 69 м); б) Микрофотография литической брекчии (сква. 09-6, 72 м, без анализатора)

Fig. 6. а) Lithic breccia of the Kamenetsk structure with clasts of crystalline rocks and minerals (borehole 05-4, 74.0 m); б) Microphotograph of lithic breccia (borehole 09-6, 72 m, plan-polarized light)

Толща литических брекчий подвержена выветриванию, причем развитие этого процесса охватывает преимущественно верхнюю часть их разреза. Выветриванию и замещению глинистыми массами подвергаются цемент пород и полевые шпаты.

На поверхности литической брекчии с размывом залегает толща переотложенной осадочной брекчии мощностью от первых метров–10 м в центральной и восточной частях структуры (скв. 05-4, 05-99) до 43-45 м в ее юго-западной части (скв. 09-3, 09-4).

Следы размыва в ее основании представлены в виде невыдержанных прослоев гравия и мелкой гальки мощностью до 1 м (скв. 09-4, инт. 66,8-67,8 м) или гравелистого песка мощностью до 5 м (скв. 09-5, инт. 61,8-66,8 м). В толще брекчии заключены невыдержанные прослойки песка и гравия мощностью от 0,5 до 5 м, разделенные прослоями обломочных пород мощностью от 2-10 м. Кроме того, в составе пород наблюдаются редкие окатанные и полуокатанные зерна кварца и полевых шпатов.

Осадочная брекчия состоит из обломков гранитов и гнейсов кристаллического основания и слагающих их минералов. Особенностью состава брекчии является присутствие обломков интенсивно выветренных обломков кристаллических пород и их кор выветривания, источником которых послужили структурные коры выветривания на поверхности кристаллического основания щита. Размер обломков колеблется от миллиметров до 5-10 см. В южной части структуры в скв. 09-5 и 09-6 распространены глыбовые брекчии гранитов и гнейсов с размером блоков и глыб до 2 м, сцементированных мелкообломочным материалом. В обломках минералов и пород осадочной брекчии отсутствуют проявления ударного метаморфизма. Брекчия не содержит органических остатков для определения возраста отложений, перекрывающих породы импактного комплекса.

Толща осадочной брекчии подвержена интенсивному выветриванию. Степень ее вторичного изменения неравномерная – от частичного замещения цемента и полевых шпатов глинистыми минералами до превращения в кварц-каолинитовые и кварц-гидрослюдистые коры выветривания. Цемент этих разностей пород иногда имеет флюидальное строение. На электронномикроскопических снимках цемента наблюдаются пакеты параллельно ориентированных

пластинчатых зерен каолинита диаметром 8-15 мкм, погруженные в бесструктурные землистые массы.

В центральной части структуры на поверхности осадочной брекчии залегает буроугольная толща мощностью 18-26 м (рис. 3, 4). В юго-западной части структуры (скв. 09-3, 09-4) буроугольные отложения отсутствуют. В основании толщи залегает невыдержанный слой глинистых и углисто-глинистых сланцев и алевролитов мощностью от 2 м (скв. 05-5) до 12 м (скв. 05-4). Сланцы содержат примесь до 25% псаммитового материала, а также единичные мелкие обломки выветренных кристаллических пород. В разрезах некоторых скважин базальный слой глинистых сланцев отсутствует, и бурые угли залегают непосредственно на поверхности толщи осадочной брекчии (скв. 05-99, 05-100, 09-5, 09-6). На поверхности углисто-глинистых сланцев лежит слой бурого угля. Уголь имеет массивную или слабо сланцеватую текстуру, цвет от темно-бурого до темно-серого и черного. В угле наблюдаются маломощные прослои, обогащенные песчаным материалом, а также прослои глин. В толще углей установлены редкие отпечатки неогеновой флоры и мелкие обломки обугленной древесины. В северо-восточной части структуры (скв. 05-98, 05-99, 05-100) на поверхности бурого угля залегает слой глины мощностью до 2 м с прослойками угля.

Одним из авторов настоящей работы (Е.А. Шевчук) выполнен палинологический анализ двух образцов углисто-глинистых сланцев из базального слоя толщи и двух образцов бурого угля. Подготовка проб для анализа проведена по методике, описанной в работе [Гричук, Заклинская, 1948].

Два образца из базального слоя толщи представлены углисто-глинистым сланцем и тонкозернистым песчаником (скв. 09-6, инт. 54,5 и 54,6 м). В обоих образцах установлено преобладающее распространение пыльцы покрытосеменных, в том числе *Quercus* sp., *Fagus* sp., *Acer* sp., *Betula* sp., *Ulmus* sp., составляющее 47% от общего числа изученных объектов, что свидетельствует о неогеновом возрасте образцов. Кроме того, в спорово-пыльцевом комплексе одного из образцов наблюдается присутствие 20% древних спор папоротникоподобных и пыльцы хвойных, а также конидии грибов *Mundkurella mohgajensis* Chitale and Yawale, *Fractisporanies* sp. и *Rhizophagites* sp. позднеюрского – раннемелового возраста.

В спорово-пыльцевых спектрах двух образцов сланцеватого бурого угля (скв. 09-5, инт. 47,6 и 47,7 м) наблюдается преобладание пыльцы покрытосеменных (40%), в том числе *Menispermium* sp., *Araliceae*, *Myrtaceae* и некоторых других. Спорово-пыльцевые комплексы свидетельствуют о неогеновом, вероятно, миоценовом возрасте отложений и сопоставимы с миоценовыми комплексами из других регионов Украины [Кораллова, 1980; Сябряй, Щекина, 1983]. В составе спектра образца бурого угля (скв. 09-5, инт. 47,6 м) также установлено присутствие 10% спор и пыльцы позднеюрского – раннемелового возраста. В этом образце сохранился отпечаток листа *Fagus orientalis* L., подтверждающий неогеновый возраст отложений. Проведенные исследования позволили определить неогеновый, вероятно, миоценовый возраст буроугольной толщи. Толща представлена наиболее ранними осадками, возраст которых определяет верхнюю возрастную границу образования Каменецкого кратера. Присутствие в составе проанализированных комплексов примеси позднеюрских – раннемеловых форм свидетельствует об их привносе в толщу осадков в результате размыва не сохранившейся до настоящего времени на поверхности щита толщи континентальных отложений этого возраста.

На поверхности буроугольной толщи залегают мелководные морские и прибрежно-морские отложения, образование которых связано с миоценовой трансгрессией на южные склоны УЩ [Атлас..., 1960; Ермаков, Капинос, 1970; Панкратов и др., 1995], охватившей район расположения Каменецкой структуры. Прибрежно-морские и мелководные морские осадки общей мощностью от 8 до 30 м представлены в этом районе переслаивающейся толщей песков, глин, известняков, мела и мергеля с прослойками гравия и ракушечного детрита. В составе отложений определена фауна: *Cardium fittoni* Orb., *Cardium roessa* Burb., *Cardium* sp., *Maetra fabreana* Orb., *Maetra caspi* Eichw., *Viviparus* sp., характеризующая среднесарматский возраст толщи [Панкратов и др., 1995].

В Каменецкой структуре мощность толщи морских отложений составляет 11–19 м. В центральной и южной частях кратера (скв. 05-4, 05-5, 09-3, 09-4, 09-7) на поверхности угля залегают мелко- и разнозернистые пески с примесью гравелистого и мелкообломочного материала кристаллических пород. Толща переслаивающихся

глин и песков содержит слой мела и мергеля мощностью от 2 до 6 м. В маломощных прослоях гравелистых песчаников с известковым цементом содержится фауна двусторчатых моллюсков плохой сохранности (скв. 05-4, инт. 18,6 м и 09-4, инт. 22,5 м). В ее составе В.А. Присяжнюком определены *Ceratoderma* sp. ind. (2 вида) и *Mastra* sp. ind., которые свидетельствуют о вероятном среднесарматском возрасте отложений.

На поверхности морских отложений залегает толща лессовидных суглинков четвертичного возраста, мощность которых в пределах Каменецкой структуры составляет от 8 до 15 м. За пределами структуры лессовидные суглинки образуют сплошной покров мощностью до 20 м на поверхности кристаллического основания и осадочных отложений неогена [Ермаков, Капинос, 1970; Панкратов и др., 1995].

Ударный метаморфизм пород и минералов Каменецкой структуры

Породы и минералы Каменецкой структуры содержат проявления ударного метаморфизма, которые сосредоточены в толще литической брекчии, залегающей на поверхности брекчированных и катаклазированных пород основания кратера. Для доказательства импактного образования структуры был изучен ударный метамор-

физм кварца, полевых шпатов и биотита. Именно уникальные изменения кварца в виде появления систем планарных элементов (ПЭ) и планарных трещин (ПТ) являются неоспоримыми доказательствами изменения минерала в импактном процессе под действием высоких ударных давлений [Stöffler, 1971, 1974; Stöffler, Langenhorst, 1994; French, 1998; French, Koeberl, 2010].

Нами изучен ударный метаморфизм кварца из литической брекчии. Кварц в виде отдельных обломочных зерен в брекчии и в составе обломков кристаллических пород содержит проявления ударного метаморфизма, представленного системами декорированных ПЭ, ПТ и мозаицизма.

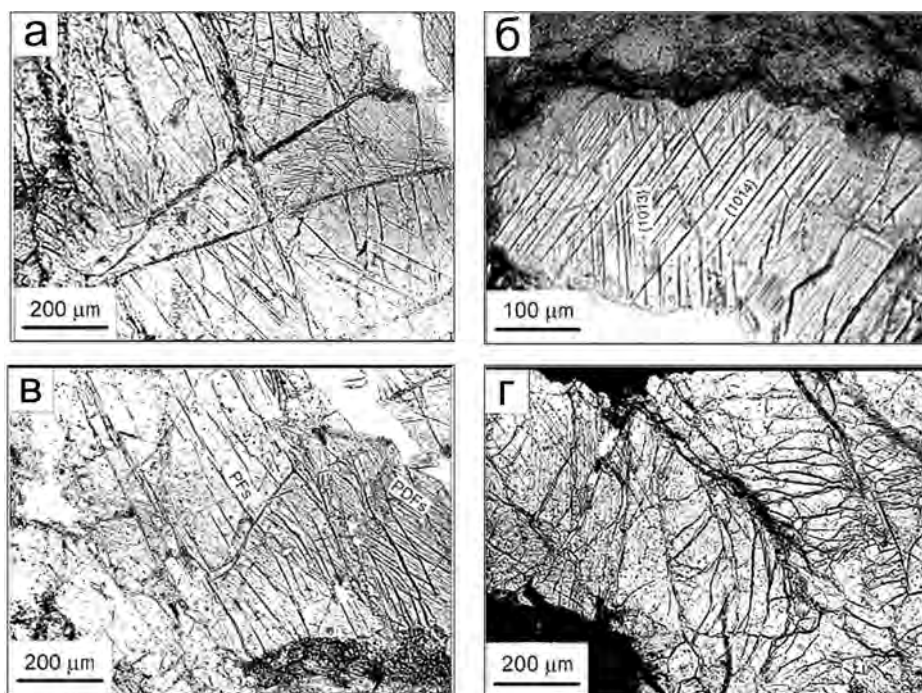
Число систем ПЭ в зернах кварца колеблется от одной до четырех и составляет в среднем около двух систем на зерно (рис. 7, а). В образцах литической брекчии (скв. 05-4, инт. 69–74 м) на столике Федорова выполнено 70 замеров ориентировки систем ПЭ в 34 зернах кварца, из которых индексированы 79% систем. Установлено преобладающее распространение систем ПЭ по $\{10\bar{1}3\}$ и $\{10\bar{1}4\}$ (рис. 7, б), составляющее соответственно 28 и 24% от общего числа замеров. Образующаяся при наиболее высоких ударных давлениях система $\{10\bar{1}2\}$ определена только в единичных замерах, составляя 4% от их общего числа. Полученная гистограмма (рис. 8) близка к

Рис. 7. Микрофотографии систем ПЭ и ПТ в кварце из литической брекчии Каменецкой импактной структуры:

а) Множественные системы ПЭ в кварце. Наблюдается слабая разориентировка систем в соседних микроблоках зерна (скв. 05-4, 74 м, без анализатора); б) Системы ПЭ по $\{10\bar{1}3\}$ и $\{10\bar{1}4\}$ имеют преобладающее распространение (скв. 05-4, 72 м, с анализатором); в) Система грубых ПТ (PTs) со смещением пересекает систему ПЭ (PDFs) (скв. 05-4, 69 м, без анализатора); г) Грубые ветвящиеся трещины и система ПЭ (в верхнем левом углу снимка) в зерне кварца (скв. 09-6, 79,5 м, без анализатора)

Fig. 7. Microphotographs of PDFs and PFs sets in Quartz from lithic breccia of the Kamenetsk impact structure:

а) Multiple PDFs in quartz. The slight disorientation of the PDFs is visible in neighboring microblocks of quartz grain (borehole 05-4, 74 m, plan-polarized light); б) $\{10\bar{1}3\}$ and $\{10\bar{1}4\}$ sets have the predominant distribution (borehole 05-4, 72 m, plan-polarized light); в) Rough PFs intersect a set of PDFs (borehole 05-4, 74 m depth, plane-polarized light); г) Quartz grain with rough irregular fractures and single set of PDFs (left part of microphotograph) (borehole 09-6, 88 m depth, crossed polars)



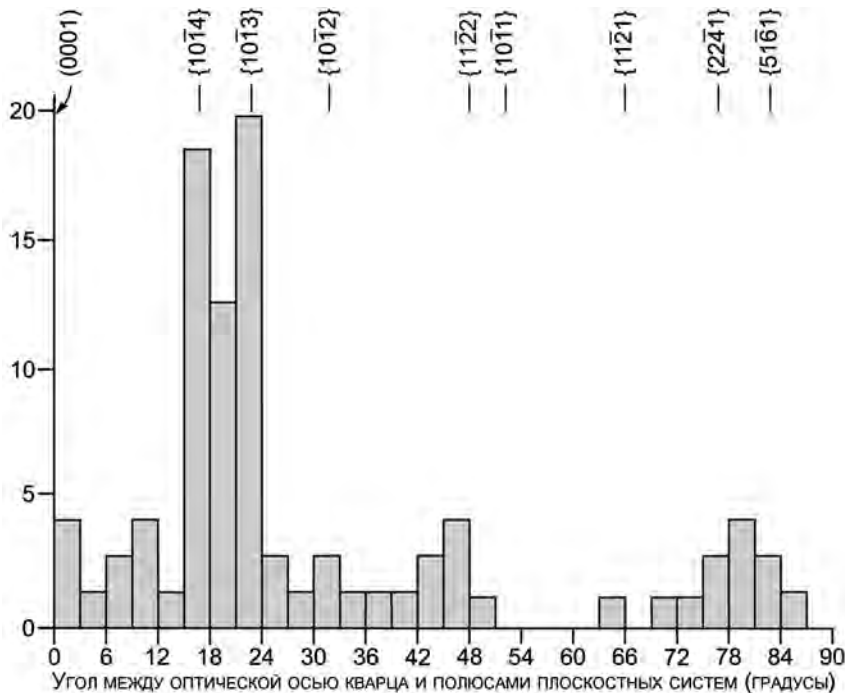


Рис. 8. Гистограмма частоты встречаемости (в %) ориентировки систем ПЭ относительно оптической оси кварца из литической брекчии по 70 замерам в 34 зернах минерала (скв. 05-4, 69-74 м)

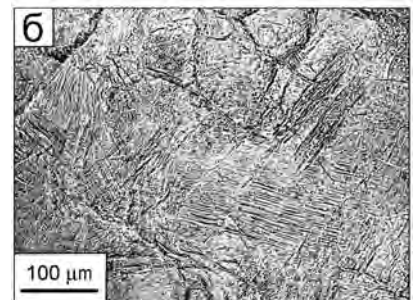
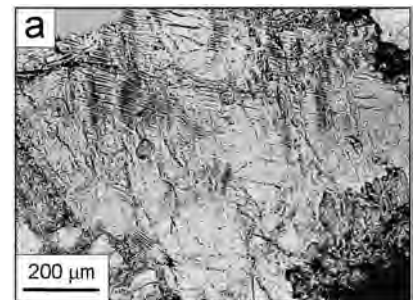
Fig. 8. Histogram of frequency percent of angles between the c-axis and poles to the planes of 70 decorated PDFs in 34 quartz grains from lithic breccia (borehole 05-4, depth between 69 and 74 m)

Рис. 9. Микрофотографии ударнометаморфизованного микроклина из литической брекчии Каменецкой структуры:

а) Множественные системы ПЭ и полосы смятия в зерне микроклина (скв. 09-6, 57 м, без анализатора); б) «Лестничные» («ladder») системы ПЭ в микроклине (скв. 05-4, 74 м, без анализатора)

Fig. 9. Microphotographs of shock metamorphosed microcline from lithic breccia of the Kamenetsk impact structure:

а) Multiple sets of PDFs in microcline from breccia (borehole 09-6, 57 m depth, plane-polarized light); б) "ladder" sets of PDFs in cataclased microcline grain (borehole 05-4, 74 m depth, plane-polarized light)



гистограммам частоты ориентировки ПЭ в кварце из толщ брекчий многих импактных структур, испытавших ударные нагрузки от 10 до 20 ГПа [Engelhardt, Bertsch, 1969; Grieve et al., 1996; French, 1998; Gurov et al., 2002; Ferriere et al., 2009].

Выполнены 30 замеров ориентировки систем ПЭ в ударнометаморфизованном кварце из основания толщи литической брекчии (скв. 09-6, инт. 108-109 м). Кроме преобладающего распространения систем $\{10\bar{1}3\}$ и $\{10\bar{1}4\}$, установлено присутствие системы бразильских двойников по (0001), которые, по данным [Stöffler and Langenhorst, 1994; French, 1998; Trapmann, 1998], образуются при ударных давлениях до 10-15 ГПа.

Наряду с ПЭ в кварце наблюдается развитие систем открытых ПТ (рис. 7, в). Установлена ориентировка ПТ по $\{10\bar{1}1\}$ и некоторым другим направлениям. Кроме закономерно ориентированных ПТ, в зернах кварца из базальных горизонтов толщи брекчий часто наблюдается развитие сложной системы неправильных ветвящихся

трещин совместно с одной-двумя системами ПЭ, распространенных в локальных участках зерен (рис. 7, г). Мозаицизм в кварце представлен в виде образования блоков размером около первых десятков микрометров, ограниченных сложной системой ветвящихся и субпараллельных трещин. В соседних блоках наблюдается разориентировка систем ПЭ.

Системы ПЭ в полевых шпатах служат дополнительными свидетельствами проявлений ударного метаморфизма пород и используются для подтверждения происхождения импактных структур [Stöffler, 1974; French, 1998; French, Koeberl, 2010]. В Каменецкой структуре ПЭ наблюдаются в полевых шпатах из толщи литических брекчий, где они распространены как в отдельных зернах, так и в обломках ударнометаморфизованных кристаллических пород. ПЭ в полевых шпатах или охватывают всю площадь их зерен (рис. 9, а), или образуют в них локальные участки размерами от 40x40 до 80x100 мкм. Рас-

стояние между ламеллями в каждой системе составляет около 2-3 мкм. Наблюдается развитие от одной до пяти систем ПЭ на зерно. Характерно образование «лестничных структур» ПЭ («ladder structures», по [French, 1998]) в пространстве между параллельными трещинами спайности полевого шпата (рис. 9, б). При одновременном развитии двух систем ПЭ они часто образуют характерные структуры типа «елочки». Изотропизация и переход полевых шпатов в диаплектовые стекла не наблюдались.

Ударный метаморфизм биотита в породах Каменецкой структуры выражается в появлении полос смятия и образовании систем ПЭ. Полосы смятия в биотите наблюдаются как в толще литических брекчий, так и в катаклазированных породах основания структуры (рис. 10, а). В отличие от полос смятия, ПЭ распространены только в биотите из толщи литических брекчий. В кристаллах биотита, ориентированных в шлифах параллельно спайности минерала, часто наблюдаются три системы планарных микроструктур, ориентированных под углом 60° друг к другу (рис. 10, б). Толщина отдельных ламелл составляет около 2 мкм, расстояние между соседними ламеллями колеблется от 5 до 15 мкм. По данным работ [Schnieder, 1972; Гуров, 1977; Гуров, Гурова, 1991], ПЭ в биотите образуются при ударном давлении выше 10 ГПа.

Изучение ударного метаморфизма в породах Каменецкой структуры показало, что в ней сохранились породы, испытавшие ударные давления около 10-20 ГПа. Ударнометаморфизованные породы и минералы более высоких ступеней ударного метаморфизма, в том числе диаплектовые стекла по каркасным силикатам, мономинераль-

ные и полиминеральные стекла плавления и расплавленные импактиты в кратере не сохранились.

Согласно закономерностям строения импактных структур [Мэлош, 1994; French, 1998], интенсивность проявлений ударного метаморфизма в заполняющих комплексах импактных пород в кратерах возрастает от основания к их верхним горизонтам, где концентрируются зювиты и ударнорасплавленные породы. В Каменецкой импактной структуре сохранилась только нижняя часть разреза комплекса импактитов, представленного толщиной литической брекчии с проявлениями ударного метаморфизма первой ступени по классификации в работе [Stöffler, 1971], в то время как брекчии и зювиты с проявлениями более высоких ступеней ударного метаморфизма размыты при эрозии.

Обсуждение и выводы

Установление проявлений ударного метаморфизма кварца в породах кольцевых структур является важнейшим доказательством их импактного происхождения [Stöffler, 1971, 1974; Stöffler, Langenhorst, 1994; French, 1998; French, Koeberl, 2010]. К настоящему времени определение ударного метаморфизма пород и минералов послужило основой для диагностики подавляющего большинства достоверных импактных структур на поверхности Земли [Масайтис и др., 1980; Grieve, 1987; Гуров, Гурова, 1991; Earth Impact Database, 2017]. При изучении Каменецкой структуры в составе слагающих ее пород установлены характерные проявления ударного метаморфизма, в том числе ПЭ и ПТ в кварце и полевых шпатах, что является обоснованным доказательством ее импактного происхождения.

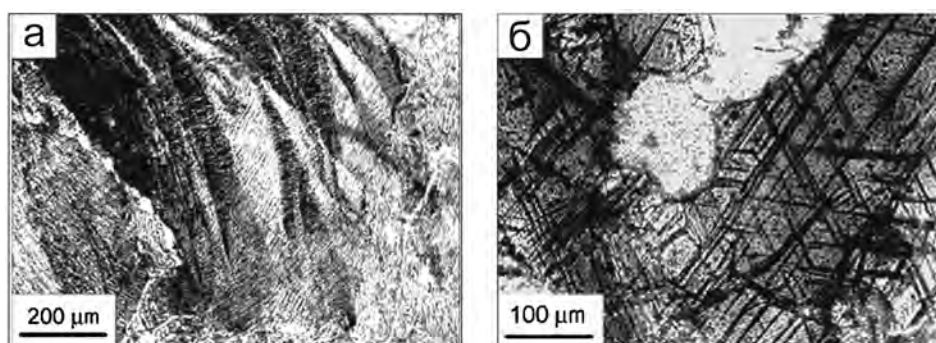


Рис. 10. Микрофотографии проявлений ударного метаморфизма биотита:

а) Полосы смятия в биотите из брекчированных пород основания Каменецкой структуры (скв. 09-5, 94 м, без анализатора); б) Системы ПЭ в базальной плоскости зерна биотита из литической брекчии (скв. 05-4, 74 м, без анализатора)

Fig. 10. Microphotographs of shocked biotite:

а) Kink bands in biotite from the brecciated basement rocks of the Kamenets structure (borehole 09-5, 94 m depth, plane-polarized light); б) Sets of PDFs in basal cleavage plane of biotite grain from the lithic breccia (borehole 05-4, 74 m depth, plane-polarized light)

На современном уровне среза диаметр Каменецкой структуры составляет 1,0–1,2 км [Романюк и др., 2006] и глубина 130 м. Исходный диаметр структуры неизвестен, однако чашеобразная форма кратера свидетельствует о том, что ее диаметр до эрозии не превышал 4 км – порогового значения для перехода к кратерам с центральным поднятием, образованным в кристаллических породах [Grieve, Robertson, 1979; Масайтис и др., 1980]. Расчетная глубина полностью сохранившейся простой импактной структуры диаметром 1,1 км по зависимости в работе [Grieve, Robertson, 1979] составляет около 350 м. Эти данные доказывают срез Каменецкой структуры и окружающей поверхности щита на глубину более 220 м, с учетом уменьшения диаметра кратера при эрозии. Такой глубокий срез кратера и мишени привел к эрозии не только коренного вала структуры и толщи посткратерных осадков, но и большей части толщи пород импактного комплекса.

Максимальная мощность сохранившейся части толщи пород импактного комплекса, представленного в Каменецкой структуре литической брекчией, составляет 60 м. В то же время мощность комплексов импактных пород в полностью сохранившихся ударных структурах достигает около половины их полной глубины [Dence et al., 1977]. В простых кратерах близкого диаметра мощность пород импактных комплексов составляет 160–200 м, в том числе в кратере Барринджер диаметром 1,2 км и полной глубиной до основания около 370–180 м [Shoemaker, 1963; Kring; 2007] и в кратере Ксиюань диаметром 1,8 км – 188 м [Ming Chen et al., 2010]. Эти данные подтверждают срез подавляющей верхней части пород импактного комплекса в Каменецкой структуре на глубину более 120 м. Отсутствие в кратере пород со следами воздействия высоких ударных давлений подтверждает глубокий эрозионный срез верхней части толщи пород импактного комплекса. Согласно классификации импактных структур по степени сохранности, предложенной в работе [Grieve, Robertson, 1979], Каменецкая импактная структура относится к пятой ступени: «заполняющие кратер импактные образования частично сохранились».

Определение возраста Каменецкой импактной структуры вызывает большие трудности в связи с тем, что в ней не сохранились ударно-расплавленные породы и стекла для определения ее изотопного возраста. Наиболее поздними образова-

ниями в мишени структуры являются протерозойские граниты кировоградского комплекса с абсолютным возрастом 2000–2100 млн лет [Панкратов и др., 1995], который определяет нижнюю возрастную границу образования кратера.

В течение палеозоя и мезозоя этот регион являлся устойчивой областью сноса, в пределах которого отсутствуют палеозойские и мезозойские осадочные отложения [Атлас..., 1960; Ермаков, Капинос, 1970; Панкратов и др., 1995].

Верхняя возрастная граница образования структуры определяется на основании возраста перекрывающих ее осадочных отложений. Первичные посткратерные осадки в кратере не сохранились. Образование импактной структуры и накопление в ней осадочной брекчии разделены длительным периодом времени, в течение которого было срезано более 220 м поверхности мишени и более 120 м пород импактного комплекса по мощности.

Залегающая на поверхности осадочной брекчии буроугольная толща охарактеризована спорово-пыльцевым комплексом неогена, вероятно, миоцена. Позднемиоценовый возраст имеют залегающие на поверхности буроугольной толщи мелководные морские отложения. Эти данные позволяют определить верхнюю возрастную границу образования кратера как поздний миоцен. Таким образом, время образования Каменецкой импактной структуры определяется широким интервалом от докембрия (2000–2100 млн лет) до позднего миоцена (11,63 млн лет) [International chronostratigraphic chart, 2016].

Каменецкая импактная структура является восьмым ударно-метеоритным кратером, установленным на УЩ. Пять импактных структур – Болтышская, Западная, Зеленогайская, Оболонская и Ротмистровская – имеют мезозойский или пограничный мел-палеогеновый возраст. Все они характеризуются относительно полной сохранностью в пределах от второй ступени («покров выбросов частично сохранился») до четвертой ступени («заполняющие кратер образования в основном сохранились») по классификации в работе [Grieve, Robertson, 1979].

Две импактные структуры – Ильинецкая и Терновская – имеют палеозойский возраст. По степени сохранности Ильинецкая структура относится к пятой, а Терновская – к шестой ступеням («заполняющие кратер образования в основном срезаны») по классификации в работе [Grieve, Robertson, 1979].

Каменецкая структура по степени сохранности близка к палеозойским кратерам УЩ. По данным изучения Ильинецкой структуры в западной части УЩ, глубина ее среза составляет около 300 м [Гуров, Гурова, 1991] или 330 м [Вальтер, Рябенко, 1977], а изотопный возраст расплавленных импактитов по данным $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метода равен $(444,6 \pm 3,9)$ млн лет [Pesonen et al., 2004]. По этим данным средняя скорость среза поверхности УЩ в указанном регионе составляла около 70 м/100 млн лет. Используя эти данные как сугубо ориентировочные, время среза Каменецкой структуры и окружающей террито-

рии щита на минимальную глубину около 220 м может быть оценено примерно 300 млн лет, а возраст кратера предположительно определен как палеозойский.

Благодарность. Авторы выражают признательность старшему научному сотруднику Института геологических наук НАН Украины Е.Ю. Ткаченко за консультации при подготовке настоящей статьи. Авторы благодарны научному сотруднику Отделения морской геологии и осадочного рудообразования НАН Украины Г.Е. Княжевскому за помощь в сборе каменного материала для изучения Каменецкой импактной структуры.

Список литературы / References

1. *Атлас* палеогеографічних карт Української і Молдавської РСР: Бондарчук В.Г. (заг. ред.). Київ: Вид-во АН УРСР. 1960. 78 карт.
Atlas of Paleogeographic Maps of Ukrainian and Moldavian SSR., 1960. (Ed. V.G. Bondarchuk). Kyiv: Vydavnytstvo AN URSSR, 78 maps (in Ukrainian).
2. *Вальтер А.А., Рябенко В.А.* Взрывные кратеры Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1977. 156 с.
Valter A.A., Ryabenko V.A., 1977. Explosion craters of the Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka, 155 p. (in Russian).
3. *Гричук В.П., Заклинская Е.Д.* Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Москва: ОГИЗ, 1948. 224 с.
Hrychuk V.P., Zaklinskaya E.D., 1948. Analysis of the fossil pollen and spores and its application in paleogeography. Moscow: OGIZ Press, 224 p. (in Russian).
4. *Гуров Е.П.* Планарные элементы в биотите из ударнометаморфизованных пород взрывных метеоритных кратеров Украинского щита. *Зап. Всесоюз. минерал. о-ва.* 1977. Ч. 106, вып. 6. С. 715-719.
Gurov E.P., 1977. Planar deformation features in biotite from shock-metamorphosed rocks of explosion meteorite craters of the Ukrainian Shield. *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, pt. 106, iss. 6, p. 715-719 (in Russian).
5. *Гуров Е.П., Гурова Е.П.* Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. Киев: Наук. думка. 1991. 160 с.
Gurov E.P., Gurova E.P., 1991. Geological structure and material composition of the rocks of impact structures. Kiev: Naukova Dumka, 160 p. (in Russian).
6. *Ермаков Ю.Г., Капинос Н.Н.* Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Сер. Центрально-украинская, лист L-36-III. Москва, 1970. 73 с.
Yermakov Yu.G., Kapinos N.N., 1970. Geological Map of USSR, scale 1:200 000. Series Central-Ukrainian, sheet L-36-III. Moscow, 73 p. (in Russian).
7. *Кораллова В.В.* Палинокомплексы пограничных олигоцен-миоценовых отложений на юге европейской части СССР. *Стратиграфия кайнозоя Северного Причерноморья и Крыма.* Днепропетровск, 1980. С. 81-85.
Korallova V.V., 1980. Palynocomplexes of the border Oligocene-Miocene depositions of the south of the European part of USSR. *Stratigraphy of Cenozoic of Northern Area of Black Sea Coast and Crimea.* Dnepropetrovsk, p. 81-85 (in Russian).
8. *Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шаденков Е.М.* Геология астроблем. Ленинград: Недра, 1980. 231 с.
Masaitis V.L., Danilin A.N., Maschak M.S., Raykhlin A.I., Selivanovskaya T.V., Shadenkov E.M., 1980. Geology of astroblemes. Leningrad: Nedra, 231 p. (in Russian).
9. *МелOSH Г.* Образование ударных кратеров: геологический процесс. Москва: Мир, 1994. 245 с.
Melosh H.J., 1994. Impact Cratering: a geologic process. Moscow: Mir, 245 p. (in Russian).
10. *Николаенко Н.А.* Геолого-прогностичні роботи масштабу 1:50 000 на родовища урану тріщинно-жильного типу в межах східного ендоконтакту Бобринецького гранітоїдного масиву на загальній площі 650 км² (топографічні карти М-36-137-В, Г; L-36-5) з оцінкою прогностичних ресурсів категорії Р3. Київ, 2007. 318 с. Фонди КП «Кіровгеологія».
Nikolaenko N.A., 2007. Geological forecasting works of the scale 1:50 000 for uranium deposits of fracture-veined type at the eastern endomorphic contact of the Bobrinetskiy granitoid massif within the area of 650 km² (topographic maps M-36-137- C, D; L-36-5) with estimation of resources prediction by category P3. Kyiv, 318 p. Archives of the Municipal Company "Kirovgeologiya" (in Ukrainian).
11. *Николаенко Н.А.* Пошуки родовищ урану гідротермально-штокверкового типу масштабу 1:25 000 в межах Розанівської площі (45 км²). Київ, 2009. 266 с. Фонди КП «Кіровгеологія».

- Nikolaenko N.A.**, 2009. Prospecting of uranium deposits of hydrothermal-stockwork type of scale 1:25 000 within the Rozanivskaya area (45 km²). Kyiv, 266 p. Archives of the Municipal Company “Kirovgeologiya” (in Ukrainian).
12. **Панкратов И.Н., Николенко К.И., Воробей А.Н.** Глубинное геологическое картирование масштаба 1:200 000 территории листов М–36–XXXIII, L–36–III. 1995. Киев: Геоинформ Украины, 388 с.
- Pankratov I.N., Nikolenko K.I., Vorobey A.N.**, 1995. Deep geological mapping of scale 1:200 000 of the area of the map sheets M-36-XXXIII, L-36-III. Kiev: Geoinform Ukrainy, 388 p. (in Russian).
13. **Романюк П.М., Василенко Є.С., Корнієнко А.І., Николаєнко М.А.** Кам’янецька структура – нова палеовулканічна споруда на Українському щиті: результати попереднього вивчення та порівняльна характеристика. *Зб. наук. пр. УкрДГРІ*. 2006. № 2. С. 32-45.
- Romaniuk P.A., Vasilenko E.C., Kornienko A.I., Nikolaienko N.A.**, 2006. Kamenetskaya structure – a new paleovolcanic edifice on the Ukrainian Shield: results of the preliminary study and comparative characteristic. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDGRI*, No. 2, p. 32-45 (in Ukrainian).
14. **Сябрай С.В., Щекіна Н.А.** История развития растительности Украины в миоцене. Киев: Наук. думка, 1983. 172 с.
- Syabray S.V., Shchekina N.A.**, 1983. History of development of vegetation of Ukraine in Miocene. Kiev: Naukova Dumka, 172 p. (in Russian).
15. **Chen M., Xiao W., Xie X., Tan D., Cao Y.** Xiuyan crater, China: Impact origin confirmed. *Chinese Science Bulletin*. 2010. Vol. 55, iss. 17. P.1777–1781.
- Chen M., Xiao W., Xie X., Tan D., Cao Y.**, 2010. Xiuyan crater, China: Impact origin confirmed *Chinese Science Bulletin*, vol. 55, iss. 17, p. 1777–1781 (in English).
16. **Dence M.R., Grieve R.A.F., Robertson P.B.** Terrestrial impact structures: Principal characteristics and energy considerations. *Impact and explosion cratering*. New York: Pergamon Press, 1977. P. 247-275.
- Dence M.R., Grieve R.A.F., Robertson P.B.**, 1977. Terrestrial impact structures: Principal characteristics and energy considerations. *Impact and explosion cratering*. New York: Pergamon Press, p. 247-275 (in English).
17. **Earth** Impact Database, 2017. URL: www.passc.net
- Earth** Impact Database, 2017. URL: www.passc.net (in English).
18. **Engelhardt W.V., Bertsch W.** Shock induced planar deformation structures in quartz from the Ries crater, Germany. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1968. Vol. 20. P. 203-234.
- Engelhardt W.V., Bertsch W.**, 1968. Shock induced planar deformation structures in quartz from the Ries crater, Germany. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 20, p. 203-234 (in English).
19. **Ferriere L., Koeberl C., Reimold U.W.** Drill core LB-08A, Bosumtwi impact structure, Ghana: Petrographic and shock metamorphic studies of material from the central uplift. *Meteoritics & Planetary Science*. 2007. Vol. 42. P. 611–633.
- Ferriere L., Koeberl C., Reimold U.W.**, 2007. Drill core LB-08A, Bosumtwi impact structure, Ghana: Petrographic and shock metamorphic studies of material from the central uplift. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 42, p. 611–633 (in English).
20. **French B.N.** Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contributions No. 954. 1998. Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute. 120 p.
- French B.N.**, 1998. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contributions No. 954, Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 120 p. (in English).
21. **French B.N., Koeberl C.** The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn’t, and why. *Earth-Science Reviews*. 2010. Vol. 98. P. 123–170.
- French B.N., Koeberl C.**, 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn’t, and why. *Earth-Science Reviews*, vol. 98, p. 123–170 (in English).
22. **Grieve R.A.F.** Terrestrial impact structures. *Annual Review Earth Planet Sciences*. 1987. Vol. 15. P. 245-270.
- Grieve R.A.F.**, 1987. Terrestrial impact structures. *Annual Review Earth Planet. Sciences*, vol. 15, p. 245-270 (in English).
23. **Grieve R.A.F., Robertson P.B.** The terrestrial cratering record. I. Current status of observations. *Icarus*. 1979. Vol. 38. P. 212–229.
- Grieve R.A.F., Robertson P.B.**, 1979. The terrestrial cratering record. I. Current status of observations. *Icarus*, vol. 38, p. 212–229 (in English).
24. **Grieve R.A.F., Langenhorst F., Stöffler D.** Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: II. Significance in geoscience. *Meteoritics & Planetary Science*. 1996. Vol. 32. P. 6-35.
- Grieve R.A.F., Langenhorst F., Stöffler D.**, 1996. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: II. Significance in geoscience. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 32, p. 6-35 (in English).
25. **Gurov E.P., Gurova E.P., Sokur T.M.** Geology and petrology of the Zapadnaya impact crater in the Ukrainian Shield. *Impacts in Precambrian shields*: Plado J., Pesonen L.J. (Eds.). Berlin: Springer, 2002. P. 170-188.
- Gurov E.P., Gurova E.P., Sokur T.M.**, 2002. Geology and petrology of the Zapadnaya impact crater in the Ukrainian Shield. *Impacts in Precambrian shields*: Plado J., Pesonen L.J. (Eds.). Berlin: Springer, p. 170-188 (in English).

26. **Gurov E.P., Koeberl C., Reimold U.W.** Petrology and geochemistry of target rocks and impactites from the Ilyinets crater, Ukraine. *Meteoritics and Planetary Science*. 1998. Vol. 33. P. 1317-1333.
- Gurov E.P., Koeberl C., Reimold U.W.**, 1998. Petrology and geochemistry of target rocks and impactites from the Ilyinets crater, Ukraine. *Meteoritics and Planetary Science*, vol. 33, p. 1317-1333 (in English).
27. **Gurov E.P., Nikolayenko N.A., Shevchuk E.A., Yamnichenko A.Yu.** Kamenetsk – a new impact structure in the Ukrainian Shield. Houston, Texas: *Lunar and Planetary Science Conference*. 48 (abstracts). 2017. # 1131.
- Gurov E.P., Nikolayenko N.A., Shevchuk E.A., Yamnichenko A.Yu.**, 2017. Kamenetsk – a new impact structure in the Ukrainian Shield. Houston, Texas: *Lunar and Planetary Science Conference*. 48 (abstracts). # 1131 (in English).
28. **International** chronostratigraphic chart. International Commission on Stratigraphy. 2016. <http://www.stratigraphy.org/index.php.ics-chart-timescale>
- International** chronostratigraphic chart, 2016. International Commission on Stratigraphy. <http://www.stratigraphy.org/index.php.ics-chart-timescale> (in English).
29. **Jolley D., Gilmour I., Gurov E., Kelley S., Watson J.** Two large meteorite impacts at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Geology*. 2010. Vol. 38. P. 835–838.
- Jolley D., Gilmour I., Gurov E., Kelley S., Watson J.**, 2010. Two large meteorite impacts at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Geology*, vol. 38, p. 835–838 (in English).
30. **Jourdan F., Reimold W.U., Deutsch A.** Dating Terrestrial impact structures. *Elements*. 2012. Vol. 8. P. 49–53.
- Jourdan F., Reimold W.U., Deutsch A.**, 2012. Dating Terrestrial impact structures. *Elements*, vol. 8, p. 49–53 (in English).
31. **Kelley S.P., Gurov E.P.** Boltysh, another end-Cretaceous impact. *Meteoritics and Planetary Science*. 2002. Vol. 37. P. 1031–1043.
- Kelley S.P., Gurov E.P.**, 2002. Boltysh, another end-Cretaceous impact. *Meteoritics and Planetary Science*, vol. 37, p. 1031–1043 (in English).
32. **Kring D.A.** Guidebook to the geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona (a.k.a. Meteor Crater). *LPI Contribution*. No. 1355. Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute. 2007. 150 p.
- Kring D.A.** 2007., Guidebook to the geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona (a.k.a. Meteor Crater). *LPI Contribution*. No. 1355. Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 150 p. (in English).
33. **Pesonen L.J., Mader D., Gurov E.P., Koeberl C., Kinnunen K.A., Donadini F., Handler R.** Paleomagnetism and ^{39}Ar - ^{40}Ar age determination of impactites from the Ilyinets impact structure, Ukraine. *Cratering in marine environments and on ice*. Dypvik H., Burchell M., Claeys P. (Eds.). Berlin: Springer, 2004. P. 253-280.
- Pesonen L.J., Mader D., Gurov E.P., Koeberl C., Kinnunen K.A., Donadini F., Handler R.**, 2004. Paleomagnetism and ^{39}Ar - ^{40}Ar age determination of impactites from the Ilyinets impact structure, Ukraine. *Cratering in marine environments and on ice*. Dypvik H., Burchell M., Claeys P. (Eds.). Berlin: Springer, p. 253-280 (in English).
34. **Schneider H.** Shock induced mechanical deformations in biotites from crystalline rocks of the Ries-crater. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1972. Vol. 37. P. 75–85.
- Schneider H.**, 1972. Shock induced mechanical deformations in biotites from crystalline rocks of the Ries-crater. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 37, p.75–85 (in English).
35. **Shoemaker E.M.** Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona. *The Moon, Meteorites and Comets*: Middlehurst B.M., Kuiper G.P. (Eds.). Chicago: University of Chicago, 1963. P. 301-336.
- Shoemaker E.M.**, 1963. Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona. *The Moon, Meteorites and Comets*: Middlehurst B.M., Kuiper G.P. (Eds.). Chicago: University of Chicago, p. 301-336 (in English).
36. **Stöffler D.** Progressive metamorphism and classification of shocked and brecciated crystalline rocks at impact craters. *Journal of Geophysical Research*. 1971. Vol. 76, No. 23. P. 5541-5551.
- Stöffler D.**, 1971. Progressive metamorphism and classification of shocked and brecciated crystalline rocks at impact craters. *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, No. 23, p. 5541-5551 (in English).
37. **Stöffler D.** Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes. II. Physical properties of shocked minerals. *Fortschritte der Mineralogie*. 1974. Bd. 51, H. 2. S. 256-289.
- Stöffler D.**, 1974. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes. II. Physical properties of shocked minerals. *Fortschritte der Mineralogie*, bd. 51, H. 2, S. 256-289 (in English).
38. **Stöffler D., Langenhorst F.** Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory. *Meteoritics & Planetary Science*. 1994. Vol. 29. P. 155-181.
- Stöffler D., Langenhorst F.**, 1994. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 29, p. 155-181 (in English).
39. **Trapmann C.A.** Shock effects in quartz: compression versus shear deformation – an example from the Rochechouart impact structure, France. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. Vol. 267. P. 322-332.
- Trapmann C.A.**, 2008. Shock effects in quartz: compression versus shear deformation – an example from the Rochechouart impact structure, France. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 267, p. 322-332 (in English).

Статья поступила
28.08.2017