



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 23–29

УДК 551.311.5

Іллінецька астроблема — найдавніша на Українському кристалічному щиті

В.Н. Криводубський¹, В.І. Солоненко², К.І. Чурюмов¹

¹Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

²Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського

Подано огляд основних характеристик Іллінецької астроблеми.

ИЛЛИНЕЦКАЯ АСТРОБЛЕМА — ДРЕВНЕЙШАЯ НА УКРАИНСКОМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ЩИТЕ. Криводубский В.Н., Солоненко В.И., Чурюмов К.И. — Приводится обзор основных характеристик Иллинецкой астроблемы.

ILLINTSI'S ASTROBLEM IS THE ANCIENTEST ONE ON THE UKRAINIAN CRYSTAL SHIELD, by Kryvodubskyj V.N., Solonenko V.I., Churyumov K.I. — Review of main characteristic of Illintsi's astrobleme are given.

Космічні дослідження засвідчили, що для всіх планет Сонячної системи, їх супутників з твердою корою та астероїдів є типовим наявність ударних кратерів, які утворюються при високошвидкісному ударі малих космічних тіл — від астероїдів до дрібних метеоритів — об поверхню небесних тіл. Раніше такі ударні кратери спостерігалися лише на Місяці. За частотою їх утворення Земля не становить винятку серед інших планет. В земну атмосферу щодоби влітає понад 20 млн. метеорних часток, маси яких не менші 0.01 г, з них біля 480 метеороїдів з масами, не меншими 1 кг [1].

При вторгненні масивного небесного тіла з космічною швидкістю в атмосферу внаслідок нагрівання воно набуває вигляду вогняної кулі — фajerболу. Процес практично миттєвого гальмування метеорита супроводжується енерговиділенням на одиницю маси, інтенсивність якого поступається лише енергетиці ядерного пального. Виділена енергія за густиною перевищує енергію кристалічних ґраток метеоритних фаз (для заліза близько $8 \cdot 10^{10}$ ерг/г), що перетворює речовину метеорита у стан сильно стисненого високотемпературного газу. Величина тиску може досягати значень в мільйон атмосфер і більше, а температура — кількох тисяч градусів. В залежності від швидкості входження в земну атмосферу кінетична енергія метеорного тіла діаметром близько 10 км сягає значень $10^{30} - 10^{32}$ ерг. Колосальна енергія руху фajerболу при зіткненні з поверхнею Землі перетворюється в енергію деформації породи і теплового вибуху. Значна частка маси як самого метеориту, так і скельних порід, що приймають удар на себе, в результаті вибуху плавиться і навіть випаровується, набуваючи стану ударної хвилі. При охолодженні застигли ударно-вибухові розплави породи (імпакти) асимілюють речовину метеорита. Разом з тим якась кількість речовини у рідкому і твердому стані, в тому числі й уламки метеорита, що не випарувалися, викидаються із зони вибуху, утворюючи на місці падіння глибоку чашкоподібну западину, оточену валом із викидів і деформацій, яка при великих розмірах отримує назву метеоритного кратера.

На нашій планеті в результаті дії води, вітрової ерозії, тектонічних процесів стародавні ударно-вибухові геологічні утворення майже повністю втратили морфологічні ознаки кратерів, і тільки спеціальні дослідження показують, що вони виникли в результаті падіння на земну поверхню крупних космічних тіл. Ці викопні стародавні ударно-вибухові геоструктури за влучним виразом Роберта Дітца [2] в 1960 р. отримали в науковій літературі назву *астроблем* (від грец. *αστρον* —

зірка і $\beta\lambda\eta\mu\alpha$ — рана), що українською мовою означає “зоряні рани” (англ. “Star Wounds”).

Сучасне вивчення вибухових метеоритних кратерів і ефектів ударного метаморфізму розпочалося у 60-ті роки, коли Е.Чао, Ю.Шумейкер і Б.Мадсен [3] відкрили в Аризонському метеоритному кратері силікатні мінерали *коесіт* і *стишовіт* (поліморфні модифікації кварцу, що утворюються тільки за високого тиску). В середині 60-тих років на основі дослідження кварцу Аризонського кратера, а також штучних вибухових ядерних кратерів було з’ясовано значення площинних систем у кварці як найкращої петрографічної ознаки ударного метаморфізму [4]. На сьогодні під *ударним метаморфізмом* розуміють незворотні зміни структури гірських порід і мінералів під практично миттєвим — впродовж сотих часток секунди — впливом потужної вибухової ударної хвилі. Згідно з сучасним рівнем знань вважається, що єдиним природним процесом, за якого може виявитися ударний метаморфізм, є падіння крупних метеоритів з космічними швидкостями. Внаслідок вивчення речовинного складу гірських порід ударних структур і порівняння їх з даними експериментального ударного стиснення мінералів, а також мінералів і порід вибухових ядерних кратерів, дослідження мінерало-петрографічних і геологічних ознак ударного метаморфізму земних та місяцевих метеоритних кратерів були встановлені макроскопічні і мікроскопічні ознаки ударно-вибухового походження кратерів [5–6]. Оскільки імпакти при остиганні асимілюють космічну речовину, то важливою ознакою удару із космосу служить *аномально підвищений вміст в них індикаторів метеоритної речовини — сідерофільних елементів* (тих, що “полюбують залізо”): іридію, нікелю, кобальту, платини, золота та ін.

Сьогодні на земній поверхні ототожнено близько 200 ударно-вибухових метеоритних кратерів. Це число приблизно на два порядки менше загальної кількості великих кратерів, утворених на Землі за останні 2 млрд. років. Слід пам’ятати, що значна частина космічних тіл впала в моря і океани або в ту частину суходолу, яка з часом опустилася під воду. Збереженість ударних кратерів залежить від стабільності геологічних структур (територій), в межах яких вони утворилися, і кліматичних умов у цих місцевостях.

Більшість метеоритних кратерів виявлено на стародавніх геологічних платформах та їх підвищених ділянках — кристалічних щитах, які тривалий час характеризувалися спокійним тектонічним режимом (північні райони Канади і колишнього СРСР). Що ж стосується кліматичних умов, то від-



Рис. 1. Астроблеми (чорні кружки ●) на Українському кристалічному щиті (заштрихована площа)

носно молоді ударні кратери найкраще збереглися в пустелях Африки, Австралії, Америки. Одну із двох найбільших і найдавніших на земній поверхні астроблем виявлено у Канаді, у провінції Онтаріо. Це кратер Садбері (Sudbury), діаметром близько 200 км і віком 1.8 млрд. років. Іншу такого ж розміру і віком біля 2 млрд. років астроблеми — кратер Вредефорт (Vredefort Ring) — ідентифіковано в Південній Африці. Великого наукового значення набули дослідження в Аризонському кратері, на місці падіння Сіхоте-Алінського метеорита, в Ріському кільцевому басейні (Нордлінгер Ріс, Баварія), а також недавнє відкриття (1970 р.) і вивчення 100-км ударного кратера Попігай на півночі Сибіру (басейн р.Попігай) віком 34–39 млн. років [7].

Подібні за масштабами явища залишили сліди і в рельєфі України. Сприятливим для консервації ударно-вибухових кратерів виявився Український кристалічний щит (УКЩ), який простягнувся з північного заходу на південний схід майже на 1000 км вздовж правого берега Дніпра, доходячи аж до Приазов'я, і має максимальну ширину 250 км [6]. Основною тенденцією його геологічної еволюції впродовж останніх 1.5 млрд. років було повільне підймання, що супроводжувалося ерозійними процесами. Якщо виходити із щільності утворення на земній поверхні кратерів діаметром більше 1 км ($12 \cdot 10^{-4}$ кратера/км² за 1 млрд. років [8]), то загальне число вибухових кратерів, що сформувалися на УКЩ за останні 500 млн. років, має становити близько 120. Завдяки своїй стабільності в геологічному відношенні протягом тривалого часу УКЩ характеризується найбільшою щільністю ототожнених астроблем ($3.5 \cdot 10^{-5}$ кратера/км²), що робить його своєрідним дослідницьким полігоном для вивчення викопних космогенних структур. На сьогодні на його поверхні відомо сім ударно-вибухових кратерів [6,9] (рис. 1):

подвійний *Зеленогайський* (Кіровоградська обл., Знам'янський р-н, поблизу села Зелений Гай, наймолодший кратер — вік не менше 60 млн. років);

Бовтиський (Кіровоградська обл., Олександрівський р-н, вік 65.2 ± 0.6 млн. років);

Ротмістрівський (Черкаська обл., Смілянський р-н, 130 ± 10 млн. років);

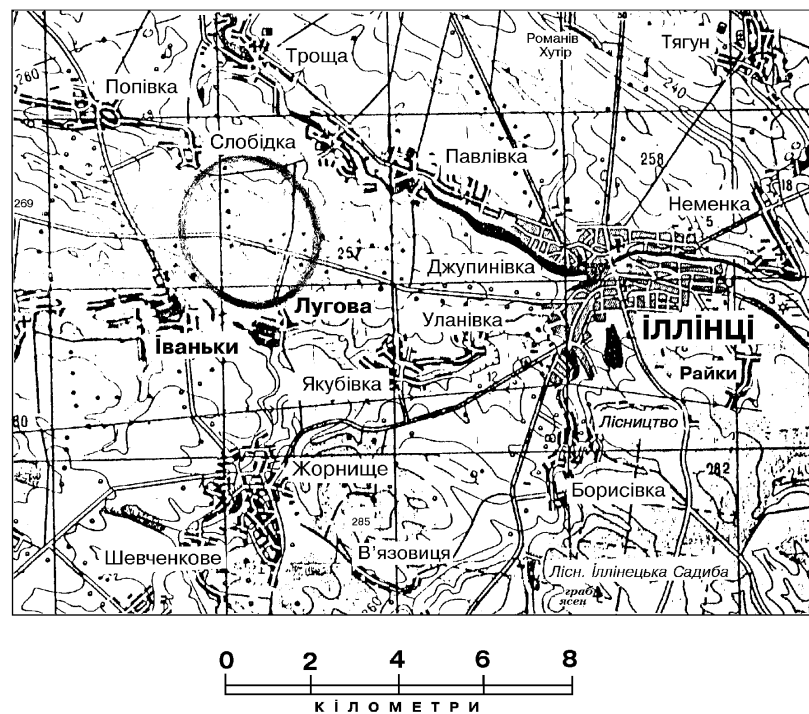


Рис. 2. Топографічний план місцевості в районі Іллінецької астроблеми. Овалом між селами Іваньки і Лугова умовно позначено розміри ударного кратера на сучасному рівні ерозійного зрізу

Білілівський (“Західний”) (Житомирська обл., Ружинський р-н, 166 ± 6 млн. років);

Оболонський (Полтавська обл., Семенівський р-н, 169 ± 6 млн. років);

Тернівський (Кіровоградська обл., поблизу села Веселі Терни, 280 ± 10 млн. років);

Іллінецький (Вінницька обл., на межі Іллінецького та Липовецького районів, найдавніший кратер — вік близько 400 млн. років).

Вже більше півтора століть вчені досліджують кристалічні породи біля містечка Іллінці на Поділлі (35 км на південний схід від Вінниці, міжріччя Соб — Сібок). Цей край Поділля несе на собі відбиток (з географічними координатами $49^{\circ}07'$ п.ш., $29^{\circ}07'$ сх.д.) удару з космосу близько 400 млн. років тому (рис. 2). В ті часи світ був зовсім іншим, ще не утворилися сучасні материки, а вся “твердь” Землі була на початковій стадії формування останнього в історії нашої планети Суперконтиненту — Пангеї (“Всієї Землі”). Тоді УКЩ, за даними українського спеціаліста з тектоніки проф. Г.І.Каляєва, входив до складу майбутньої Східно-Європейської платформи і знаходився біля екватора приблизно на тій самій довготі, що й зараз. Тому точка перетину орбіти космічного тіла з поверхнею планети в палеозойську еру мала зовсім відмінні від сучасних координати. Тільки з часом, внаслідок тектонічних процесів, дрейфу материків і континентів під час розпаду Пангеї ця космогенна структура змістилася на територію сучасної України. Свідченням просування УКЩ крізь тропічні широти є донецьке вугілля, що утворилося з рослинності тропічних боліт на 100 млн. років пізніше Іллінецького вибуху.

Перші геологічні дослідження поблизу Іллінців провів 1851 року майбутній ректор Київського університету проф. К.М.Феофілактів, який указав на існування тут незвичної гірської породи, відмінної за своїм зовнішнім виглядом від оточуючих її гранітів. У 1898 р. В.Є.Тарасенко [10] описав результати перших петрографічних досліджень порід кратера за допомогою поляризаційного мікроскопа. Суттєво нові результати було отримано тільки через 60 років в результаті інтенсивних геолого-знімальних робіт українських геологів. Незвичність проявів відносно молодого, як тоді вважалося, вулканізму в області гірських порід породили ідею про тектоно-магматичну активізацію і можливий зв'язок з нею рудних родовищ. І тільки в 1973 р. українські геологи А.А.Вальтер і В.А.Рябенко [11] і незалежно їх колега із Ленінграда В.Л.Масайтис [12] на основі встановлення

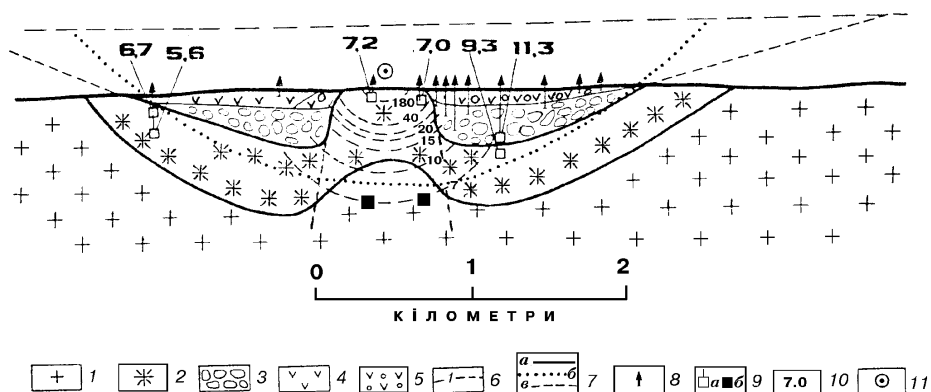


Рис. 3. Схематичний геологічний розріз Іллінецького ударно-вибухового кратера (по лінії північний захід — південний схід, що проходить через центр кратера) з елементами реконструкції значень імпульсного тиску в породах чокола: 1 — собіти та інші кристалічні породи основи кратера; 2 — коптокаталізатори за породами основи; 3 — алогогенно-аутогенна литокластична брекчія; 4 — скловидні імпактити (тагаміти); 5 — зювіти; 6 — початкове положення ізобар імпульсного тиску; 7 — контури кратера: а — сучасні, б — фази ексакації, в — до ерозії; 8 — свердловини; 9 — стан зразків, для яких зроблено оцінку імпульсного тиску: а — сучасний стан; б — розрахований вихідний; 10 — оцінка імпульсного тиску за зміною кварцу; 11 — розраховане заглиблення метеорита. Пунктирна лінія у верхній частині рисунка — розраховане початкове положення земної поверхні в момент удару з космосу.

ознак ударного метаморфізму мінералів (іллінєцьких “ортофірів” і “туфів”) пояснили по-іншому появу палеозойських розплавлених порід серед ранньопротерозойських гранітів, а саме, як результат вибухового падіння метеорита. Для Іллінєцького геологічного утворення характерна локальна негативна гравітаційна аномалія округлої форми, а в його імпактітах було виявлено підвищений проти земного вміст нікелю і кобальту в співвідношеннях, характерних для порід, “забруднених” метеоритною речовиною, що дало підставу остаточно і однозначно ідентифікувати цю геологічну структуру як типовий ударно-вибуховий кратер — тобто астроблему [13, 14]. Відкриття тут невдовзі (в 1975 р.) імпактних алмазів стало другим в світі (після Попігайського кратера) виявленням алмазів в корінних породах. Незначне збагачення ударних розплавів порід Іллінєцького кратера іридієм було встановлено значно пізніше [15]. Наслідком падіння космічного тіла було утворення складного метеоритно-вибухового кратера з первісним діаметром близько 7 км глибиною до 600–800 м з центральною гіркою діаметром близько 800 м біля її основи (рис. 3). За оцінками, його маса була близько 40 млн. тон, а діаметр — 230–300 м [6].

Породи аутигенного комплексу (“мішені”), що вміщують Іллінєцький кратер, відносяться до нижнього протерозою (вік 2.0–2.2 млрд. років). Серед них переважають собіти — кислі породи чарнокитової серії, склад яких коливається від діоритів до роговообманкових гранітів. Досить широко поширені також лейкократові рожеві граніти і пегматити, а також біотитові, амфіболові, піроксенові гнейси (рис. 4) [16].

Вік кратера визначався двома способами: радіологічним (шляхом ізотопного датування часу утворення імпактного скла) і біостратиграфічним (як інтервал часу між віком наймолодших порід мішені і найдавніших осадових порід кратера). Отримані цифри варіюються від 750 до 360 млн. років. Найновіші визначення [16] підтверджують раніше отриманий [17, 18] нижньодевонський вік 400

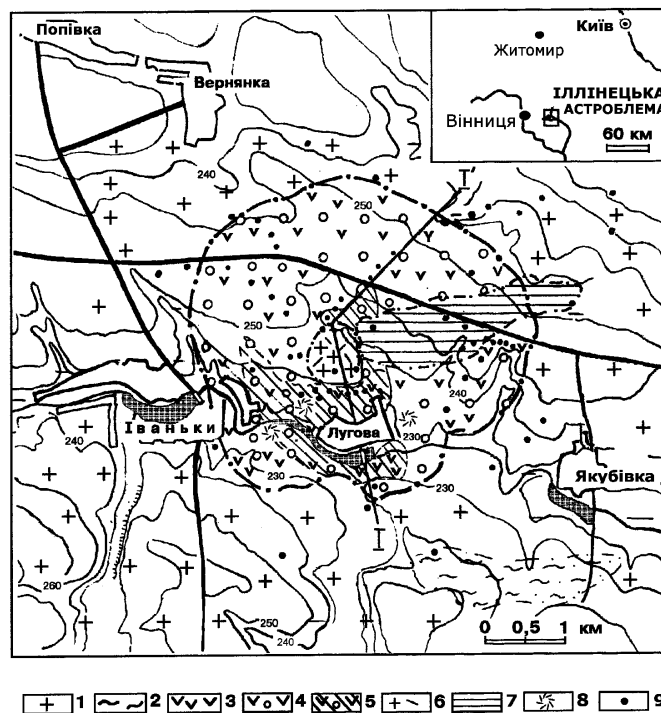


Рис. 4. Схематична геологічна карта Іллінєцького кратера: 1 — гранітоїди (собіти); 2 — гнейси; 3 — тагаміти; 4 — зювіти; 5 — поширення тагамітів під шаром зювітів; 6 — брекчійовані гранітоїди центрального підняття; 7 — алевроліти і глини кратерних осадових порід; 8 — відслонення; 9 — свердловини.

млн. років. Зауважимо, що за 400 млн. років структура кратера була глибоко еродована — сучасна поверхня знаходиться приблизно на 400 м нижче початкового положення земної поверхні в момент удару з космосу, тому зовнішній діаметр області поширення імпаکتитів і алогенних брекчій на сучасному рівні ерозійного зрізу становить 3.2 км, а діаметр брекчійованих гранатоїдів центральної гірки — близько 650 м.

Інтерес до проблеми вивчення ударно-вибухових кратерів суттєво зріс після того, як було виявлено можливу їх роль в історії Землі. В результаті досліджень останніх років встановлено парagenетичний зв'язок початку геологічних віків з астроблемами: моменти зіткнення астероїдних тіл із Землею збігаються в часі з настанням нового геологічного віку і змінами складу органічного світу [19–21]. Аналіз шкали геологічного часу [22], дослідження періодичності вимирання біоти [23], а також оцінки віку великих викопних ударних структур на Землі (як свідчення можливої періодичності космічних ударів) [23–26] показали, що найбільш ймовірне значення періоду метеоритного кратероутворення має бути близьким до 30 млн. років, з інтенсивним метеоритним бомбардуванням у вузькому інтервалі часу (близько 1/6 періоду) [20]. Сучасна епоха характеризується інтенсивним кратероутворенням, яке ще може тривати близько мільйона років [20].

На середину 2002 року були визначені орбіти близько 1500 астероїдів, що періодично наближаються до орбіти Землі (АНЗ) на відстань до 1.2 а.о. Але це лише незначна частка їх числа. Ймовірність зіткнення АНЗ із Землею мізерна, однак внаслідок великої їх кількості за мільйон років може статися одне зіткнення з астероїдом діаметром в один кілометр, а раз на сто років — з тілом діаметром 50 м. За розрахунками [1] загальний доплив маси космічних тіл на Землю за рік в інтервалі мас $10^{12} - 10^{22}$ г становить $4 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^8$ кг. І якщо за останній мільярд років аккреція космічної речовини була сталою, то радіус нашої планети за цей час збільшився принаймні на 4 см.

Усвідомлення реальної космічної загрози людству примушує вчених різних країн об'єднувати зусилля з метою пошуку шляхів запобігання їй. Недавно (в 1999 і 2002 рр.) у м.Вінниці відбулися дві міжнародні конференції “КАММАК — Комети, астероїди, метеори, метеорити, астроблеми, кратери”, присвячені проблемі взаємодії малих тіл Сонячної системи з планетами і утворенню ударно-вибухових геоструктур. Було проведено спеціальні сесії з виїздом учасників конференцій до району Іллінецької астроблеми. Сотні астрономів у всьому світі працюють над проблемою завчасного виявлення небезпечних астероїдів і комет. Значний внесок у її розв'язання зробили і українські астрономи, які розробили програму дослідження метеорно-астероїдно-кометної небезпеки [1]. Виявивши небезпечного космічного мандрівника за кілька років до зіткнення зі Землею, можна технічними засобами змінити його траєкторію так, щоб він не влучив у нашу планету. Принципово технологія вже розроблена. Але для здійснення запропонованих проектів необхідна інтеграція науково-технологічного потенціалу всіх високорозвинених країн.

1. Кручиненко В.Г., Волощук Ю.І., Кащеев Б.Л., Казанцев А.М., Лупішко Д.Ф., Яцків Я.С. Метеорно-астероїдна небезпека та доплив космічної речовини на Землю // Космічна наука і технологія. — 1999. — 5, № 1. — С. 3–17.
2. Dietz R.S. Meteorite impact suggested by shatter cones in rock. Three cryptoexplosion structure yield new evidence of natural hyper-velocity shocks // Science. — 1960. — 131, № 3416. — P. 1781.
3. Chao E.C.T., Shoemaker E.M., Madsen B.M. First natural occurrence of coesite // Science. — 1960. — 132, № 3421. — P. 220.
4. Шорт Н.М. Ударные процессы и геология // В кн.: Искусственные кратеры на Земле и планетах. — М., 1968. — С. 30–67.
5. Grieve R.A.F. Impact Cratering on the Earth // Scientific American. — 1990. — 262, № 4.
6. Вальтер А.А., Рябенко В.А. Взрывные кратеры Украинского щита. — Киев: Наукова думка, 1977. — 154 с.
7. Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Попигайская котловина — взрывной метеоритный кратер // Докл. ДАН СССР. — 1971. — 197, № 6. — С. 1390–1393.

8. *Hartmann W.K.* Terrestrial and Lunar flux of larger meteorites in the last two billion years // *Icarus*. — 1965. — **4**, № 2. — P. 157–165.
9. *Кашкаров Л.Л., Назаров М.А.* Возраст Болтышского ударного кратера (Украина) по данным трековых исследований // Сучасні проблеми комет, астероїдів, метеорів, метеоритів, астроблем і кратерів. Труды Першої міжнародної конференції КАММАК'99. Під ред. К.І.Чурюмова. — Вінниця, 2000. — С. 381–386.
10. *Тарасенко В.Е.* Об эффузивной горной породе из Липовецкого уезда Киевской губернии. — К., 1898. — 13 с.
11. *Вальтер А.А., Рябенко В.А.* Петрографічні ознаки ударно-метеоритного походження Іллінецької астроблеми (Вінницька область) // Геол. журнал. — 1973. — **33**, № 6. — С. 139–141.
12. *Масайтис В.Л.* Геологические последствия падений кратерообразующих метеоритов. — Л.: Недра, 1973. — 17 с.
13. *Вальтер А.А.* Расшифровка Ильинецкой структуры как астроблемы (Винницкая обл., УССР) // ДАН СССР. — 1975. — **224**, № 6. — С. 1377–1379.
14. *Вальтер А.А., Рябенко В.А.* Іллінецька структура — вибуховий метеоритний кратер // Геол. журнал. — 1976. — **36**, № 1. — С. 41–52.
15. *Gurov E.P., Koeberl Ch., Reimold W.U.* Petrography and geochemistry of target rocks and impactites from the Ilyinets Crater, Ukraine // *Meteoritics & Planetary Sci.* — 1998. — **33**. — P. 1317–1333.
16. *Вальтер А.А., Криводубский В.Н., Солоненко В.И.* Ильинецкая астроблема // Сучасні проблеми комет, астероїдів, метеорів, метеоритів, астроблем і кратерів. Труды Першої міжнародної конференції КАММАК'99. Під ред. К.І.Чурюмова. — Вінниця, 2000. — С. 367–380.
17. *Никольский А.П.* Взрывные метеоритные кратеры Украинского щита вблизи г. Винница // Геол. журнал. — 1975. — **35**, № 4. — С. 76–86.
18. *Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мацак М.С. и др.* Геология астроблем. — Л.: Недра, 1980. — 231 с.
19. *Афанасьев С.Л., Фельдман В.И.* Астроблемы и начала геологических веков // *Астрон. Вестник*. — 1996. — **30**, № 1. — С. 33–36.
20. *Вальтер А.А., Финкель Л.С.* Проблема периодичности метеоритной бомбардировки Земли // *Астрон. Вестник*. — 1996. — **30**, № 1. — С. 37–42.
21. *Иванов Б.А.* Метеорные удары: геологическая история Земли и сравнительная планетология // *Астрон. Вестник*. — 1996. — **30**, № 1. — С. 3–4.
22. *Harland W.B., Cox A.V., Llewellyn P.G. et al.* A geological time scale. — Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1982. — 131 p.
23. *Raup P.M., Sepkoski I.I.* Periodicity of extinctions in the geologic past // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. — 1984. — **81**, № 3. — P. 801–805.
24. *Alvarez W., Muller R.A.* Evidence from crater ages for periodic impacts on the Earth // *Nature*. — 1984. — **308**, № 5691. — P. 718–720.
25. *Devis M., Hut P., Muller R.A.* Extinction of species by periodic comet showers // *Nature*. — 1984. — **308**. — P. 715–718.
26. *Shoemaker E.M., Wolf R.F.* Crater ages, comet and the putative “death star” // *Meteoritics*. — 1984. — **19**, № 4. — P. 313.

Надійшла до редакції 9.09.2004