

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.02.067>

УДК 550.8.05:550.311+551.439

Ю.І. Дубовенко, <https://orcid.org/0000-0002-8128-5989>

О.А. Чорна, <https://orcid.org/0000-0003-3643-1016>

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

E-mail: nemishayevc@ukr.net, oksana.chornaya@gmail.com

Про імпактну природу Іллінецької кільцевої структури за даними градієнтів сили тяжіння

Представлено академіком НАН України В.І. Старостенком

Узагальнено і доповнено матеріали геологічної будови і геофізичної вивченості Іллінецької кільцевої структури на південно-західному схилі Українського щита. Здійснено моделювання будови центральної частини кратера за даними спільного аналізу 2D і 3D моделей поля сили тяжіння та його трансформант – модулів горизонтального градієнта сили тяжіння. У результаті моделювання виявлено періодичний хвилоподібний характер деструкції вмісних порід у центрі структури. Фронт деструкції окреслено за даними аналітичного продовження вгору на 1 км спостереженого поля сили тяжіння над центром кратера. Ці результати можна трактувати на користь додаткового підтвердження імпактної гіпотези щодо генезису Іллінецької структури. З позицій хвилового процесу оцінено наближені параметри імпактної події – масу метеороїда, глибину проникнення і енергію вибуху. Ці оцінки на понад 5 % відхиляються від відомих з літератури даних. Оцінка $2,57 \cdot 10^{25}$ ерг вкладається в діапазон енергій для імпактних подій середнього масштабу.

Ключові слова: імпакт, сила тяжіння, горизонтальний градієнт, моделювання, трансформанти сили тяжіння.

Утворення ударних кратерів у планетних системах є одним із наслідків нелінійної гравітаційної взаємодії твердих фрагментів міжзоряної речовини. Цей процес розпочався з часів формування планет і астероїдів з протопланетного диска і триває протягом всієї їх еволюції. Значний імпульс швидкості під час колапсу зоряної системи ($\sim 0,2 \div 1 \cdot 10^2$ км/с) дає можливість осколкам різного розміру досягати меж інших планетних систем. Набуваючи гіпершвидкості в “гравітаційній спіралі”, вони проникають крізь атмосферу до поверхні планети і формують ударні кратери, випаровуючи частку планетарної речовини [1].

Від моменту зіткнення відбувається незворотна трансформація земної поверхні в місці удару. Вона послідовно проходить такі стадії: контакт – стиснення – екскавація – модифікація – ударний метаморфізм – поліморфізм високого тиску – утворення імпактитів (слі-

Цитування: Дубовенко Ю.І., Чорна О.А. Про імпактну природу Іллінецької кільцевої структури за даними градієнтів сили тяжіння. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2022. № 2. С. 67–74.

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.02.067>

ди метеорита в брекчіях та розплавлених породах) — деформація — денудація — перекриття осадами [2]. На основі різного рівня *збереженості* наслідків цих стадій відбувається параметризація імпактних структур і складаються геологічні карти їхніх локацій.

За даними супутникових місій складено детальні карти локацій ударних кратерів (імпаکتів) на поверхні планет земної групи [3]. На Землі внаслідок впливу рухів тектонічних плит і процесів ерозії, вивітрювання та седиментації збереглася незначна частка ударних кратерів. Чимало з них видозмінені до невпізнання або поховані. Підтверджена в геофізичних полях і видозмінених породах (літологія ударного метаморфізму) лише мала частка кратерів, утворених на Землі [4].

Супутник TanDEM-X (2010—2016 рр.) із синтезованою апертурою радара зібрав масив даних інтерферометрії, що лягли в основу глобальної цифрової моделі земного рельєфу. За її детальним топографічним аналізом створено атлас усіх підтверджених на 2020 р. наземних імпактних структур для континентів Землі (понад 200 об'єктів), з геологічними описами і фото [4]. На території України виявлено вісім кільцевих структур [5]. Вони мають різний ступінь вивчення і *параметризації*, тому слід комплексно тлумачити природу структур, що мають неповні чи неоднозначні докази походження.

Іллінецька кільцева структура належить до найбільш вивчених ударних структур України [5—12] та досі має статус спірної геологічної конструкції. Так, у праці [13] стверджується, що Іллінецька кільцева структура є вулканічним комплексом осадових порід. Згідно з результатами спеціальної обробки супутникового знімка для центральної частини площі і даних сканування резонансних частот, у межах цієї структури не виявлено на поверхні відгуків від алмазів і кімберлітів, натомість отримані сигнали від ультрамафічних порід (із 80 м) і лонсдейліту (на 300—610 м, на 1, 5, 10, 20, 23 км). Корінь каналу з ультрамафічних порід визначено на глибині 723 км. Припускається, що в межах Іллінецького кратера може існувати молодший *канал* із коренем на глибині 470 км (мають бути різні ультрамафічні породи до 470 км і після), а лонсдейліт може синтезуватись у подібних структурах. Ці дані не прояснили генезис (вулканічний чи метеоритний) Іллінецького кратера.

Нові дані аналізу трансформант гравітаційного та магнітного полів над центральною частиною цієї кільцевої структури [12] можуть підсилити докази її первісно імпактного генезису.

Геологічна будова. Іллінецька структура розташована за 10 км на захід від м. Іллінці Вінницької області в долині р. Собок, у межах Волино-Подільського кристалічного масиву Українського щита (GPS: 49°7'0"N 29°6'0"E). До 1970-х рр. її вважали силур-девонським вулканом. Пізніше в породах виявили ознаки ударного метаморфізму, її віднесли до астроблем [6—9]. У 1979 р. геологічна експедиція виявила тут характерні для метеоритних кратерів *лонсдейліти* [10].

Структура, у межах якої знаходяться відслонення (6 шт.) і свердловини (55 шт.), є полігоном для вивчення *ударного* метаморфізму мінералів і утворення кратерів. Половина свердловин не досягнули кристалічного чоколя, зупинившись у корі. Західна частина структури не вивчена, а достовірність побудов структур вибуху і центрального *підняття* низька. У 2010 р. тут пройдені три свердловини (від 121,1 до 140,3 м) і проведена детальна площинна магніторозвідка 50×50 м, щоб уточнити геологічну будову і генезис Іллінецької структури. Нині домінує погляд про її імпактне походження [8—10, 12] у результаті зі-

ткнення з твердою оболонкою земної кори метеорита (масою ~40 млн т і діаметром ~300 м) близько 445 млн років тому (верхній ордовик). Вважається, що під час падіння метеорит розколовся на три частини, одна детонувала в повітрі, дві проплавили поверхню аргілітів на території, де нині розташовані села Лугова й Іваньки. Нині площа кратера зменшилась із 7 до 3,2 км, межі кратера стали нечіткими. Досі не вивчені межі поширення *похованих* комплексів гірських порід і можливий механізм утворення структури. Наше дослідження уточнює достовірність побудов, визначених раніше [10, 11].

Іллінецький кратер — найдавніша еродована структура Українського щита розміром $4 \times 5,5$ км, діаметр зони подрібнених порід ~7 км. У розрізі має чотири породних комплекси: цокольний, коптогенний, комплекси заповнення і перекриття. На дні кратера (~800 м) залягають гірські породи *цокольного* комплексу (аутигенна брекчія, незміщена вибухом, з архей-ранньопротерозойських порід того ж складу, що в облямівці структури). З глибиною ознаки *ударного* метаморфізму загасають. Ядро метеорита лежить на глибині 700 м. Кратер має підвищений вміст нікелю, іридію, кобальту, розсипи дрібних алмазів. Деталі породних комплексів описані в [11].

Геофізичні поля. Відображення геології Іллінецької структури на картах геофізичних полів описані в працях [10, 11]. Нагадаємо їх головні риси. У гравітаційному полі структура має мінімум 6×7 км овальної форми амплітудою 6,5 мГал північно-західного простягання. Мінімум перевищує площу поширення *імпактитів* і зумовлений впливом зони тріщинуватих *катаклязованих* порід кристалічного фундаменту. На карті *горизонтального градієнта* сили тяжіння мінімум має концентрично-зональну будову, виділяється від двох до п'яти рядів концентричних ланцюжків або фрагментів зон малих значень градієнта (20—40 Е). Вони утворені за рахунок накладеного ефекту гравітації від додаткового розуцільнення кристалічних порід у тектонічних зонах кільцевого закладання. Це вказує на асиметрію її будови і структурну неоднорідність [11]. Магнітне поле структури доволі спокійне, негативне ($-400 \div -600$ нТл). Зовнішній контур структури в ньому не проявляється, в центральній частині є ряд локальних мінімумів. Із них два інтенсивних екстремуми амплітудою 1000 і 700 нТл утворюють двогорбу негативну аномалію розміром 350×150 м, яка збігається з інтенсивним локальним мінімумом сили тяжіння. Високоградієнтний магнітний мінімум є унікальним для імпактних структур Землі.

Інтерпретація геофізичних полів. Методика інтерпретації передбачає виконання первинного якісного аналізу цифрових моделей потенціальних полів і підбору відповідної їм початкової моделі середовища. Цей аналіз ґрунтується на *одночасному* використанні 2D і 3D моделі поля сили тяжіння, відображеній на картах контурів, тіньового рельєфу та векторних полів за допомогою програмного забезпечення Golden Software Surfer. І подібні перетворення також застосовані і для аналізу поведінки поля та його трансформант (градієнтів). Результати інтерпретації окремих елементів геофізичних полів Іллінецької структури наведені нижче. Згідно з уявленнями про будову регіону і розподіл густин, ми прийняли градієнтно-шарувату модель зростання густини з глибиною, враховуючи наявність зон сталих значень густини [12].

Виділення густинних неоднорідностей у плані для побудови моделі першого наближення здійснювалося за вихідним полем сили тяжіння (в редукції Буге) і за картами його трансформант, зокрема, горизонтального градієнта (рис. 1). Виявлено, що у полі трансформант гравітаційного поля виразно підкреслені ізометричні особливості аномалії.

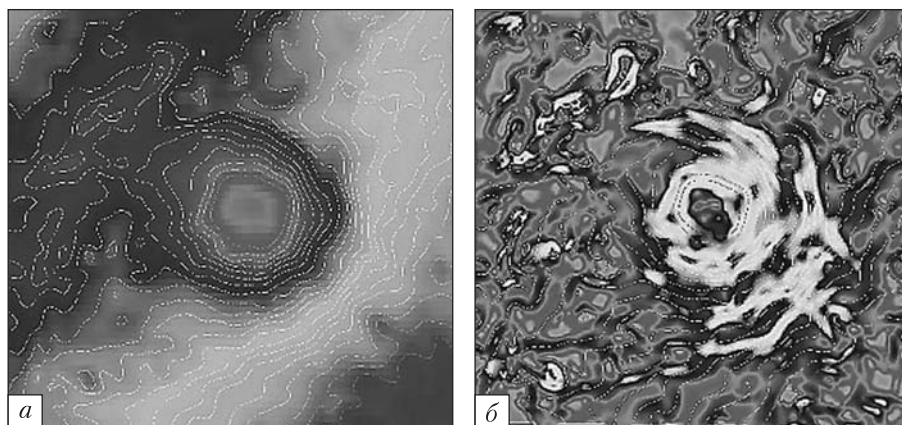


Рис. 1. Спостережене поле сили тяжіння (а) і поле модуля його горизонтального градієнта (б)

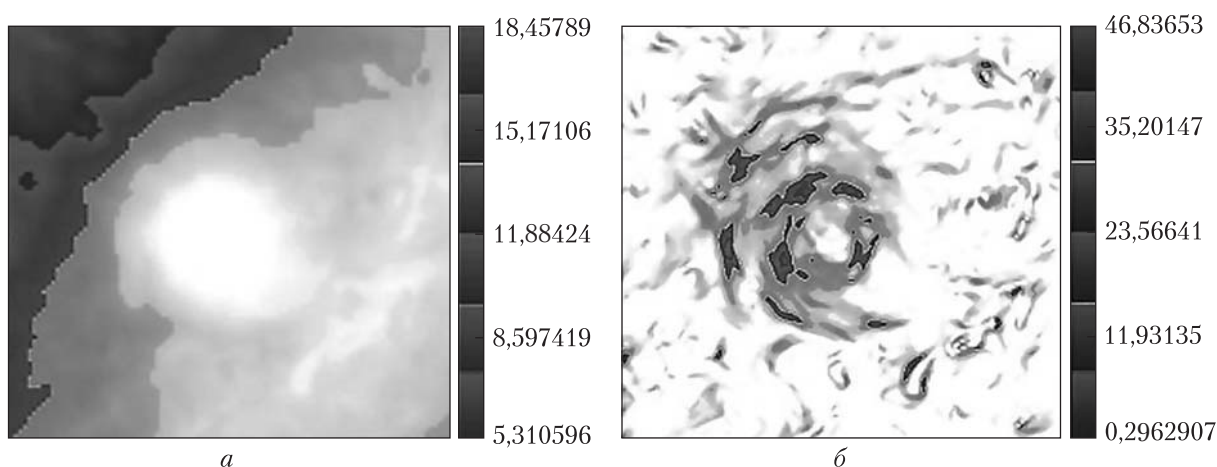


Рис. 2. Продовжені вверх на 1 км спостережене поле сили тяжіння (а, хвилеподібний характер поширення фронту деструкції) і поле модуля його горизонтального градієнта (б)

Так, у полі горизонтального градієнта *підсилена* центральна частина аномалії і *різкіше* проявилися межі центральної частини структури. Якщо прийняти метеоритну гіпотезу походження Іллінецької структури, то в картині поля модуля горизонтального градієнта (МГГ) сили тяжіння в його верхній лівій частині проявляється яружна аномалія, яку можна трактувати як проекцію на денну поверхню *положення* конуса викиду, утвореного в результаті імпаکتної події.

Порівняння спостереженого поля та МГГ підкреслює *плавний* розподіл густини всередині Іллінецької структури. Чіткі контури свідчать про відсутність у структурі *додаткових дислокацій* і порушень (розломів). Тобто від моменту утворення Іллінецька структура поводить в полі тектонічних напружень як *усталений* структурний комплекс.

При продовженні вверх спостереженого поля сили тяжіння та поля МГГ у полі МГГ (рис. 2) проявилася концентрична структура. Інтенсивність її палітри в моделі відображає кореляцію комплексів порід, які мають схожі фізичні властивості. Комплекс зювітів (темний колір) має виразну *концентричну* структуру, що є наслідком обмеженого в часі *періодичного* характеру ударної дії зовнішнього об'єкта на вмисні породи. Цей короточасний квазіперіодичний процес подібний за впливом на породи до дії вибухової хвилі.

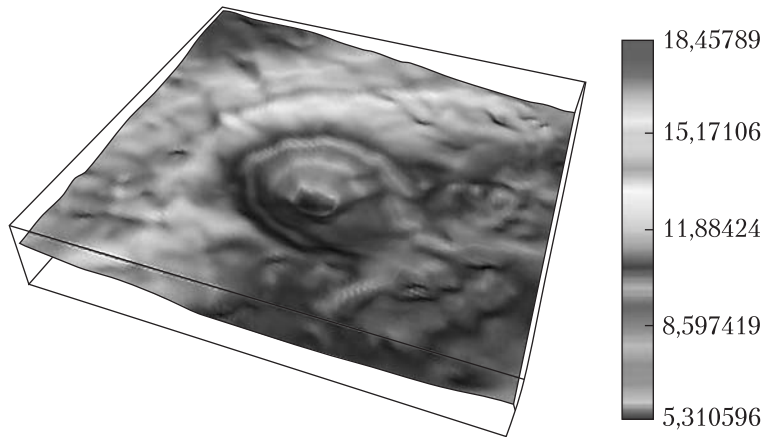


Рис. 3. 3D модель спостереженого поля сили тяжіння в редукції Буге

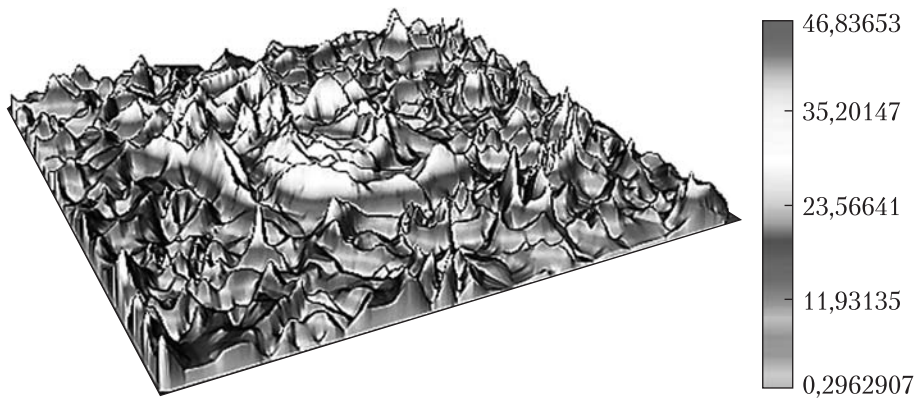


Рис. 4. 3D модель поля модуля горизонтального градієнта сили тяжіння

Здійснено якісний аналіз 2D моделей поля сили тяжіння і модуля його горизонтального градієнта (див. рис. 1), доповнений сумісним аналізом аналітично продовженого вгору на висоту 1 км поля сили тяжіння в редукції Буге (див. рис. 2) і результатами різницевого аналізу даних 3D моделей поля сили тяжіння та модуля його горизонтального градієнта (рис. 3 і 4). У результаті виявлено можливий фронт поширення *деструкції* порід, який отримав фізичне втілення у *зональному розшаруванні* його специфічних літологічних комплексів (див. рис. 2).

У світлі імпактної гіпотези *уточнимо* енергію вибуху твердого тіла заданої густини і глибину проникнення. Енергію вибуху (~580 Мт ТНТ) оцінювали із позицій імпульсу, а з позицій квазіперіодичної події вона зростає майже на 6 %.

Метеорит став джерелом миттєвого об'ємного вибуху всередині гранітних порід, що створив динамічне поле *надлишкового тиску* у фронті ударної хвилі. Цей газодинамічний процес можна відтворювати в комп'ютерній системі моделювання газопотоків FlowVision (чисельне розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь Нав'є—Стокса для газової динаміки). Поширення вибухової хвилі має ударно-хвильовий характер (виникає складна градієнтна хвильова картина багатократних косих відбиттів прямих і відбитих ударних хвиль від деформованого вибухом консолідованого середовища) [14].

Попередні оцінки параметрів ударної події можна здійснити за методикою [15]. Задіємо такі вхідні параметри для обчислень: діаметр тіла $d = 300$ м, діаметр кратера $d_0 = 7100$ м, швидкість входу в атмосферу $v_0 = 11\,000$ км/с, густина тіла $\sigma = 3000$ кг/м³ (кам'яний метеорит), тривалість вибуху $t = 3$ с. Отримано такі результати: тиск ударної хвилі під час входження в атмосферу $p \approx 1056$ атм., на поверхні ґрунту $p_0 \approx 1345$ атм.; тиск газоподібних продуктів на стінки кратера $p_1 \approx 895633$ атм., глибина проникнення $h \approx 707$ м, маса метеороїда $m \approx 42,41$ Мт, тротил-еквівалент енергії вибуху $q \approx 615,8$ Мт ТНТ ($2,57 \cdot 10^{25}$ ерг). Розрахунки наведені для одного тіла і одного удару; якщо метеор у повітрі розвалився на кілька уламків, як зазначають окремі дослідники, і відбулася серія вибухів на різній висоті, параметри метеороїда можуть збільшитися майже на порядок (згідно з моделлю Boslough—Crawford).

Висновки. Результати дослідження підтверджують припущення про *періодичний* характер вибуху: припускаючи взаємно однозначний лінійний зв'язок між полем і середовищем, з розподілу трансформант цього поля стає очевидним, що вибухова дія поширювалася як хвиля, а не одномоментний *імпульс*. Оцінки енергії, витраченої на утворення структури, вкладаються у діапазон, властивий для імпактних подій середнього масштабу. Це є одним із непрямих свідчень імпактного генезису Іллінецького кратера.

Результати аналізу та порівняння 2D і 3D моделі аномальної структури за її гравітаційним полем та його трансформантами дають підставу тлумачити Іллінецьку кільцеву структуру в світлі її *імпактного* генезису. Аналіз розподілу аномалій поля МГГ показує, що основна частина енергії під час імпактної події припала на протилежні грані структури (північну і західну), і дає змогу уточнити межі похованих комплексів гірських порід.

Моделювання магнітних полів неоднозначне [11], адже за тривалу історію деструкції Іллінецької структури її породи зазнавали численних змін магнітних властивостей. Компроміс може полягати в тому, що первісно *імпактні* породи зазнали вулканічних перетворень у процесі подальших тектонічних активізацій у межах Волино-Подільського кристалічного масиву.

Іллінецька структура має тривалу багатоетапну історію розвитку. Дані петрографії підтверджують ударну природу зювітів і брекчій. А збагачення імпактитів хромітом, хімізм тагамітів, палеомагнітні дані і морфологія дна заперечують імпактний генезис Іллінецького кратера. Необхідні подальші комплексні геофізичні дослідження структури з урахуванням електричних і теплових параметрів порід у її межах.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Vid'machenko A.P., Morozhenko A.V. Space investigations and physics of the Solar system bodies. *Наук. вісник НТУУ "КПІ"*. 2006. №. 6. С. 71–81.
2. McGetchin T.R., Settle M., Head J.W. Radial thickness variation in impact crater ejecta: implications for lunar basin deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1973. **20**. P. 226–236. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90162-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90162-3)
3. Відьмаченко А.П., Мороженко О.В. Порівняльна планетологія: навч. носієник. Київ: ТОВ ДІА, 2013. 552 с.
4. Gottwald M., Kenkmann Th., Reimold W.U. Terrestrial impact structures. The TanDEM-X Atlas. Part 1 and 2. Munich: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 2020. 608 p.
5. Вальтер А.А. Астроблемы Украинского щита. *Современные проблемы комет, астероидов, метеоров, метеоритов, астроблем и кратеров*: Труды междунар. конф. КАММАК–99 (Винница, 26 сент.—1 окт. 1999). Винница, 2000.

6. Михайлова Н.П., Гинтов О.Б., Карзанова А.Я., Кравченко С.Н. О природе Ильинецкой кольцевой структуры в свете палеомагнитных данных. *Геол. журн.* 1978. **38**, № 5. С. 51–58.
7. Никольский А.П. Взрывные метеоритные кратеры Украинского щита вблизи г. Винница. *Геол. журн.* 1975. **35**, № 4. С. 76–86.
8. Вальтер А.А., Рябенко В.А. Ильинецкая структура — взрывной метеоритный кратер. *Геол. журн.* 1976. **36**, № 1. С. 42–49.
9. Гинтов О.Б., Шевченко Т.П., Голуб В.Н. Об эндогенной природе Иллинецкой структуры. *Геол. журн.* 1975. **35**, № 1. С. 54–60.
10. Гуров Е.П., Гурова Е.П. Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. Киев: Наук. думка, 1991. 160 с.
11. Ентин В.А., Орлюк М.И., Гуськов С.И., Федоров А.В., Павлюк В.Н., Друкаренко В.В. Геофизические аспекты строения и генезиса Ильинецкой структуры: импакт или вулкан? *Геофиз. журн.* 2013. **35**, № 1. С. 100–112.
12. Dubovenko Y.I., Chorna O.A., Kuzminets M.P. Modeling of the potential fields transformants for the ring structure Illinetska. *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects: Proceedings of the 19th International Conference* (Kyiv, 11–14 May 2020). 18450. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo062>
13. Якимчук Н.А., Корчагин И.М. О возможности использования мобильных прямопоисковых методов для поисков скоплений технических микро-алмазов (лонсдейлитов). *Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов* : Материалы XXII Всерос. с междунар. уч. науч.-практ. Щукинской конф. (Воронеж, 22–25 сентября 2020 г.). Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2020. С. 390–395.
14. Налісько М.М. Розвиток наукових основ підвищення безпеки у протяжних спорудах при розповсюдженні ударних повітряних хвиль: дис. ... д-ра техн. наук. / Держ. ВНЗ “Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури”. Дніпро, 2019. 429 с.
15. Klimi G., Greenstein J. (2011). Estimation of destructive power of meteorites and meteors. City Tech 8th Annual Poster Session, 18 November, 2011. 32 p. https://www.researchgate.net/publication/304784315_Estimation_of_Destructive_Power_of_Meteorites_and_Meteors

Надійшло до редакції 12.08.2021

REFERENCES

1. Vid'machenko, A. P. & Morozhenko, O. V. (2006). Space investigations and physics of the Solar system bodies. *Naukovi visti NTUU “KPI”*, No. 6, pp. 71-81.
2. McGetchin, T. R., Settle, M. & Head, J. W. (1973). Radial thickness variation in impact crater ejecta: implications for lunar basin deposits. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 20, pp. 226-236. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90162-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90162-3)
3. Vidmachenko, A. P. & Morozhenko, O. V. (2013). Comparative planetology: Textbook. Kyiv: Dia. Ltd. (in Ukrainian).
4. Gottwald, M., Kenkmann, Th. & Reimold, W. U. (2020). Terrestrial impact structures. The TanDEM-X Atlas. Part 1 and 2. Munich: Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
5. Valter, A. A. (1999, September-October). Astroblesmes of Ukrainian Shield. Proceedings of the International Conference Modern problems of comets, asteroids, meteors, meteorites, astroblesms and craters. Vinnitsa (in Russian).
6. Mikhailova, N. P., Gintov, O. B., Karzanova, A. Y. & Krvchenko, S. M. (1978). On the nature of Ilyinets annular structure in in light of paleomagnetic data. *Geol. J.*, 38, No. 5, pp. 51-58 (in Russian)
7. Nikolskii, A. P. (1975). Explosive meteorite craters of Ukrainian Shield near Vinnitsa city. *Geol. J.*, 35, No. 4, pp. 76-86 (in Russian)
8. Valter, A. A. & Ryabenko, V. A. (1976). Ilyinets structure is explosive meteorite crater. *Geol. J.*, 36, No. 1, pp. 42-49 (in Russian).
9. Gintov, O. B., Shevchenko, T. P. & Golub, V. N. (1975). On endogenous nature of Ilyinets structure. *Geol. J.*, 35, No. 1, pp. 54-60 (in Russian).
10. Gurov, E. P. & Gurova, E. P. (1991). Geological structure and material composition of rocks of impact structures. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).

11. Entin, V. A., Orliuk, M. I., Guskov, S. I., Fedorov, A. V., Pavliuk, V. N. & Drukarenko, V. V. (2013). Geophysical aspects of structure and genesis of Ilyinets structure: impact or volcano? *Geophys. J.*, 35, No. 1, pp. 100-112 (in Russian).
12. Dubovenko, Y. I., Chorna, O. A. & Kuzminets, M. P. (2020, May). Modeling of the potential fields transformants for the ring structure Illinetska. Proceedings of the 19th International Conference Geoinformatics: theoretical and applied aspects. (18450). Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo062>
13. Yakimchuk, N. A. & Korchagin, I. N. (2020, September). On the possibility of using mobile direct search methods to search for accumulations of industrial micro-diamonds (lonsdaleites). Proceedings of the XXII All-Russian with International Participation Scientific and Practical Shchukin Conference Structure, material composition, properties, modern geodynamics and seismicity of platform territories and adjacent regions (pp. 390-395). Voronezh: Ed. house of Voronezh State University (in Russian).
14. Nalysko, M. M. (2019). Development of scientific bases for improving safety in long structures during the propagation of shock air waves: (Unpublished Doctor thesis). Prydniprovska State Academy of Civil Engineering & Architecture. Dnipro (in Ukrainian).
15. Klimi, G. & Greenstein, J. (2011, November). Estimation of destructive power of meteorites and meteors. City Tech 8th Annual Poster Session. https://www.researchgate.net/publication/304784315_Estimation_of_Destructive_Power_of_Meteorites_and_Meteors

Received 12.08.2021

Yu.I. Dubovenko, <https://orcid.org/0000-0002-8128-5989>

O.A. Chorna, <https://orcid.org/0000-0003-3643-1016>

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: yuriiguy@gmail.com, oksana.chornaya@gmail.com

ON THE IMPACT NATURE OF THE ILYINETS ANNULAR STRUCTURE ACCORDING TO GRAVITY GRADIENTS

The materials of the geological structure and geophysical study of the Ilyinets annular structure on the southwestern slope of the Ukrainian Shield are generalized and supplemented. The structure of the central part of the crater is modeled according to the data of the joint analysis of 2D and 3D models of the gravity field and its transformants – modules of the gravity horizontal gradient. Because of modeling, the periodic wavy nature of the destruction of the host rocks in the center of the structure was revealed. According to the analytical continuation of the observed gravity field upward on 1 km above the center of the crater the destruction front is delineated. These results can be interpreted in favor of the additional confirmation of the impact hypothesis regarding the genesis of the Ilyinets structure. From the standpoint of the wave process, the approximate parameters of the impact event are estimated – the mass of the meteoroid, the depth of penetration, and the energy of the explosion. These estimates deviate by more than 5 % from the data known from the literature. Estimate $2.57 \cdot 10^{25}$ erg is intended for the energy range for medium-scale impact events.

Keywords: *impact, gravity, horizontal gradient, modeling, gravity transformants.*