



” Мислінчук В., Фещук Ю. Фрактальні підходи у технологіях цифрової візуалізації часу під час 3D моделювання астрономічного обладнання. *Освіта. Інноватика. Практика*, 2025. Том 13, № 7. С. 76-83. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i7-011>.

Myslinchuk V., Feshchuk Yu. Fraktalni pidkhody u tekhnolohiiakh tsyfrovoy vizualizatsii chasu pid chas 3D modeliuvannia astronomichnoho obladnannia [Fractal approaches in digital time visualization technologies during 3D modeling of astronomical equipment]. *Osvita. Innovatyka. Praktyka – Education. Innovation. Practice*, 2025. Vol. 13, No 7. S. 76-83. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i7-011>.

УДК 37:[331.53]:004.94

DOI: 10.31110/2616-650X-vol13i7-011

**Володимир МИСЛІНЧУК**

*Рівненський державний гуманітарний університет, Україна*

<https://orcid.org/0000-0002-7629-4215>

[volodymyr.myslinchuk@rshu.edu.ua](mailto:volodymyr.myslinchuk@rshu.edu.ua)

**Юрій ФЕЩУК**

*Рівненський державний гуманітарний університет, Україна*

<https://orcid.org/0000-0003-4890-0588>

[yurii.feshchuk@rshu.edu.ua](mailto:yurii.feshchuk@rshu.edu.ua)

### ФРАКТАЛЬНІ ПІДХОДИ У ТЕХНОЛОГІЯХ ЦИФРОВОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ЧАСУ ПІД ЧАС 3D МОДЕЛЮВАННЯ АСТРОНОМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Анотація.** На підставі теоретико-емпіричних досліджень визначено, що у контексті часу та його візуалізації фрактали допомагають відобразити складні, багаторівневі процеси, які повторюються у різних часових масштабах. У процесі 3D моделювання є можливість симулювати циклічні й самоподібні часові зміни (схід-захід, зміни сезонів), використовувати фрактальні алгоритми для генерації складних, але передбачуваних змін тіней і світла. Під час моделювання астрономічного обладнання (сонячні годинники, телескопи, планетарії тощо) фрактальні підходи допомагають розробити структури, які максимально точно розподіляють або спрямовують світло. У статті робиться акцент на 3D моделюванні в процесі виготовлення саморобного обладнання з астрономії, а саме сонячного годинника. Встановлено, що цифровий сонячний годинник це сучасна інтерпретація традиційного сонячного годинника, який, замість простого положення тіні, показує час у вигляді справжніх цифрових цифр, як на електронному дисплеї. Пропонується така послідовність 3D моделювання: створення набору координат для розташування кожної цифри відповідно до позиції Сонця у певний час; створення базового об'єму у вигляді нахиленої 3D-платформи; формування маленьких виступів або отворів (своєрідних 3D-пікселів), які або блокують, або пропускають світло; створення 3D-цифр, кожна з яких (0-9) розбивається на фрагменти (пікселі), які відкидають правильну тінь у відповідний час; накладення всіх позицій у єдину модель; усунення зайвих виступів, що можуть давати неправильні тіні в інший час; моделювання шляху Сонця і перевірка, як проєктуються цифри у різні години; експорт моделі у формат \*.stl для 3D-друку; 3D-друк. Встановлено, що інтеграція фрактального підходу у процес розробки астрономічного обладнання не лише розширює межі традиційної технічної думки, а й формує нову методологію цифрової візуалізації на основі математичної естетики. Подальші дослідження у цьому напрямку можуть полягати у створенні функціональних, візуально привабливих і освітньо значущих приладів, що поєднують точність, красу та наукову інноваційність.

**Ключові слова:** фрактальні підходи; цифрова візуалізація часу; 3D моделювання; сонячний годинник.

**Volodymyr MYSLINCHUK**

*Rivne State University for the Humanities, Ukraine*

<https://orcid.org/0000-0002-7629-4215>

[volodymyr.myslinchuk@rshu.edu.ua](mailto:volodymyr.myslinchuk@rshu.edu.ua)

**Yurii FESHCHUK**

*Rivne State University for the Humanities, Ukraine*

<https://orcid.org/0000-0003-4890-0588>

[yurii.feshchuk@rshu.edu.ua](mailto:yurii.feshchuk@rshu.edu.ua)

### FRactal Approaches in Digital Time Visualization Technologies During 3D Modeling of Astronomical Equipment

**Abstract.** Based on theoretical and empirical research, it has been determined that in the context of time and its visualization, fractals help to reflect complex, multi-level processes that repeat on different time scales. In the process of 3D modeling, it is possible to simulate cyclical and self-similar time changes (sunrise-sunset, seasonal changes), to use fractal algorithms to generate complex but predictable changes in shadows and light. When modeling astronomical equipment (sundials, telescopes, planetariums, etc.), fractal approaches help to develop structures that distribute or direct light as accurately as possible. The article focuses on 3D modeling in the process of manufacturing homemade astronomical equipment, namely a sundial. It has been established that a digital sundial is a modern interpretation of a traditional sundial, which, instead of a simple shadow position, shows time in the form of real digital digits, as on an electronic display. The following sequence of 3D modeling is proposed: creating a set of coordinates for the location of each digit according to the position of the Sun at a certain time; creating a base volume in the form of an inclined 3D platform; forming small protrusions or holes (a kind of 3D pixels) that either block or transmit light; creating 3D digits, each of which (0-9) is divided into fragments (pixels) that will cast the correct shadow at the appropriate time; superimposing all positions into a single model; eliminating unnecessary protrusions that may cast incorrect shadows at other times; modeling the path of the Sun and checking how the digits are projected at different times; exporting the model to \*.stl format for 3D printing; 3D printing. It has been established that the integration of the fractal approach into the process of developing astronomical equipment not only expands the boundaries of traditional technical thought, but also forms a new methodology of digital visualization based on mathematical aesthetics. Further research in this direction may consist in creating functional, visually appealing, and educationally meaningful devices that combine accuracy, beauty, and scientific innovation.

**Keywords:** fractal approaches; digital visualization of time; 3D modeling; sundial.

**Вступ.** Саморобне обладнання може відігравати надважливу роль як у навчальному процесі, так і аматорських наукових дослідженнях, оскільки поєднує у собі доступність, гнучкість та практичну цінність. Його виготовлення дозволяє глибше зрозуміти фізичні закони, які лежать в основі роботи приладу, а також стимулює учнів до активного пізнання, експериментування й вирішення реальних технічних завдань [2]. Саморобні пристрої часто вимагають не стандартного підходу, що сприяє розвитку технічного мислення, винахідливості й інженерних навичок. До того ж, можливість адаптувати обладнання під конкретну навчальну або дослідницьку мету робить його ефективним інструментом у STEM-освіті, особливо в умовах обмеженого бюджету або відсутності доступу до професійного лабораторного обладнання [3].

Астрономічні знання відіграють важливу роль у формуванні наукового світогляду, розширюючи уявлення про Всесвіт та місце людини у ньому. Астрономія сприяє розвитку логічного та критичного мислення, оскільки базується на спостереженні, аналізі та інтерпретації складних природних явищ. Розуміння законів руху небесних тіл має практичне значення для навігації, орієнтації в часі та просторі, а також для розробки сучасних технологій, таких як супутникові системи зв'язку та глобального позиціонування (*GPS*). У ширшому контексті астрономія допомагає виховувати в людині допитливість, прагнення до пізнання та повагу до природи, що є надзвичайно цінними як у повсякденному житті, так і в професійній діяльності. На спостереженні періодичних рухів небесних тіл, зокрема обертанні Землі, руху її навколо Сонця та фаз Місяця, базується і вимірювання часу в астрономії. Саморобний сонячний годинник можна рахувати одним із перших астрономічних приладів, виготовлених людиною. У своїх попередніх роботах [4], ми приділяли увагу питанням проектування, моделювання та 3D друку пристрою для вимірювання часу за зміною довжини тіні від гномону та дослідження її руху по циферблату. Розглянутий у роботі горизонтальний сонячний годинник дозволяє проводити визначення справжнього сонячного часу, географічної широти і довготи місцевості; а також проводити дослідження характеристик руху Сонця. При цьому фіксація результату традиційно проводиться за величиною та напрямком тіні від гномона.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Впродовж останніх років в науковій спільноті спостерігається зростаючий інтерес використання фрактальних методів до моделювання складних фізичних систем. Сьогодні теорія мультифракталів та фракталів активно застосовується для опису властивостей самоподібності та масштабної інваріантності, які характеризують різні фізичні ситуації. Засновником сучасної теорії фракталів не безпідставно вважається Бенуа Мандельброт. У своїй відомій праці «*The fractal geometry of nature*» [5] він запропонував поняття фракталу, як математичного об'єкту, що має властивість самоподібності та дробову розмірність. Саме дана праця вважається фундаментальною для подальших досліджень у різних галузях – від цифрової графіки до природознавства. Пізніше розвиток фрактальної геометрії продовжили такі дослідники як Майкл Барнслі, який у книзі «*Fractals Everywhere*» [14] описав алгоритмічне створення фракталів з використанням ітераційних функціональних систем. У контексті цифрової візуалізації й комп'ютерної графіки важливими є праці Кеннета Фальконера, зокрема «*Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*» [13], де надано строгий математичний апарат для фрактального аналізу. Саме Фальконер детально розглядає застосування фракталів у моделюванні природних форм і технічних структур.

Кінець 80-их – початок 90-их років ХХ століття характеризується появою у фахових математичних виданнях наукових публікацій, присвячених теоретичному обґрунтуванню можливості створення фрактальних і цифрових моделей сонячних годинників [19, 8, 22]. Дані дослідження започаткували новий напрям у вивченні взаємозв'язку між геометричними структурами та вимірюванням часу. Фрактальні механізми у контексті цифрового моделювання часу являють собою сукупність математичних та алгоритмічних підходів, що базуються на принципах фрактальної геометрії [1]. Їхня особливість полягає у здатності моделювати складні, багаторівневі структури та процеси, які характеризуються самоподібністю, нерівномірністю та нестабільністю. У сфері астрономії дані характеристики тісно пов'язані з природою багатьох космічних явищ [10]. Одним із найяскравіших прикладів є моделювання сонячної активності, яка проявляється у вигляді періодичних спалахів, плям, протуберанців, що повторюються з варіативною інтенсивністю та частотою [23]. Дані циклічні зміни можуть бути описані через фрактальні патерни, оскільки структура їх виникнення має багаторівневу схожість та відображає характерну самоподібність [16]. Крім того, розподіл матерії у Всесвіті володіє масштабною симетрією [12], що підтверджується розподілом зоряної маси (на основі даних *Sloan Digital Sky Survey*) [11] та розподілом галактик [17], які також демонструють фрактальні та мультифрактальні властивості.

**Мета та завдання.** Метою статті є висвітлення ролі і місця 3-D моделювання в процесі виготовлення саморобного обладнання з астрономії. Основні завдання: охарактеризувати зміст та навести приклад практичного застосування 3-D моделювання в процесі виготовлення і проектування астрономічного обладнання (сонячного годинника). Причому використання фрактальних підходів у

технологіях цифрової візуалізації часу дозволяє отримати саморобне обладнання, створене з урахуванням наукових принципів і технічних вимог, може демонструвати високу точність і надійність у виконанні експериментальних завдань. При належному проектуванні й виготовленні такі прилади не поступаються за якістю стандартним лабораторним зразкам, а іноді навіть перевершують їх завдяки функціональній гнучкості та можливості адаптації. Висока якість саморобного обладнання підтверджується його ефективністю у навчальному процесі та наукових дослідженнях, а цифрова візуалізація часу сприяє формуванню стійкого ефекту емоційного залучення, що зумовлює підвищення пізнавального інтересу до досліджуваного матеріалу. Саме завдяки динамічному відображенню часових процесів у візуально привабливій формі, активізуються когнітивні механізми сприйняття, що покращує запам'ятовування та розуміння складних понять.

**Методи.** Для досягнення поставленої мети дослідження та реалізації його завдань було застосовано комплекс методів наукового пізнання, які охоплюють як теоретичні, так і практико-візуальні підходи. Зокрема, до теоретичних методів належать: аналіз навчально-методичної літератури; вивчення актуальних наукових публікацій за тематикою дослідження; систематизація та узагальнення отриманих відомостей. Практична частина дослідження включала використання візуалізаційних методів, зокрема представлення складових об'єкта дослідження у форматі тривимірних моделей для забезпечення наочності та полегшення сприйняття матеріалу. Крім того, було реалізовано етап матеріалізації досліджуваного об'єкта та проведено розрахунково-моделювальні процедури з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, що надало змогу досягти високої точності та інтерактивності в дослідницькому процесі.

**Результати.** Поява сонячного годинника пов'язана з ранніми етапами розвитку людської цивілізації, коли з'явилось усвідомлення залежності довжини і положення сонячної тіні від об'єктів і положенням світила на небі. І не зважаючи на те, що точна дата появи сонячного годинника не відома, існує припущення, що перші його форми з'явилися приблизно у 3500 році до н.е. У процесі свого історичного розвитку сонячні годинники зазнали суттєвої еволюції – від простих вертикальних гномонів до складних астрономічних інструментів із точними розрахунками географічної широти та цифрової фіксації часу. Удосконалення конструкції та принципів роботи цих приладів відображає поступове накопичення наукових знань у галузі астрономії, геометрії та фізики (оптики).

Першим справжнім сонячним годинником із цифровим циферблатом (рис. 1) можна вважати пристрій Стіва Хайнса (1984 рік), в якому оптичні волокна прокладалися в циліндрі від освітленого екрану до семи сегментних цифр, які відображали години та хвилини [21]. Стів Хайнс є винахідником багатьох оптичних пристроїв, але саме визначення проблеми цифрової візуалізації як оптичного аналого-цифрового перетворювача зробили її цікавою і в подальшому успішно реалізовану. У 1988 році Стів Хайнс отримав патент США на сонячний годинник з цифровим відображенням часу [20].

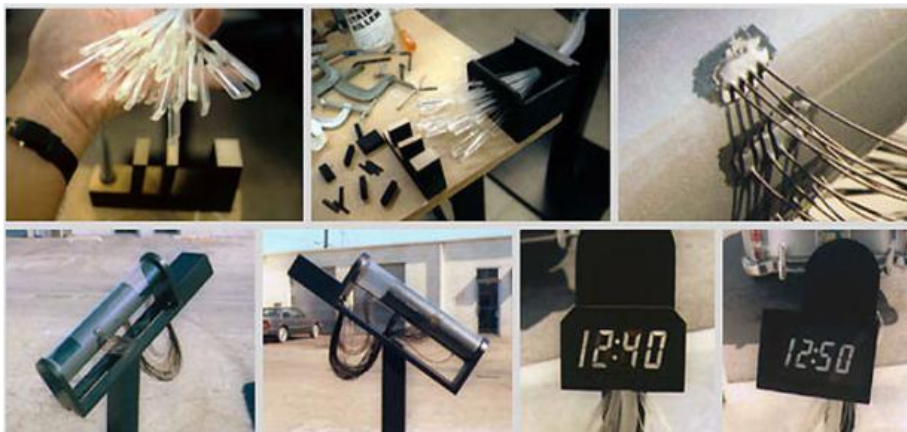


Рис. 1. Цифровий циферблат Стіва Хайнса

У своїй конструкції сонячного годинника Хайнс використав властивість існування постійного кута огляду обмеженої частини неба, крізь повздовжні щілини з кожної точки внутрішньої поверхні циліндра. Це дозволило змодельовати годинні та хвилинні щілини призначені для освітлення визначеної частини оптичного волокна у певний момент та на певний проміжок часу, що вважається прототипом оптичного аналого-цифрового перетворювача. У патентних примітках показана схема освітлення частин 7-сегментного числа. Оскільки кутовий діаметр Сонця (близько 30') еквівалентний його руху тривалістю  $\pm 2$  хвилини, то роздільна здатність будь-якої конструкції сонячного годинника становить не менше 4 хвилин. Кожний цифровий сегмент годинника має кілька прикріплених оптичних волокон. Сегменти збираються в коробку дисплея, а оптичні волокна проходять до різних

освітлених місць на циліндрі. Повздовжні прямі щілини забезпечують освітлення оптичних волокон відповідно до місцевого сонячного часу. Теоретично цифровий годинник може давати і поясний час, якщо використовувати для отвору щілини у вигляді кривих у формі аналеми [21]. Практично схема аналеми не працює, оскільки потребує використання двох повних масок, тобто необхідні два годинники. Крім того адекватні покази можливі лише за умови, що всі волокна, призначені для певного інтервалу, згруповані у точці, розташованій посередині між щілинами. Також існують й інші технологічні обмеження циліндричних циферблатів, які використовують заломлюючі середовища (світло не може проникати у волокно під кутом, що значно перевищує його числову апертуру), це призводить до зменшення добового часу коректного функціонування приладу.

У цифровій візуалізації часу фрактальні механізми дозволяють не лише відображати динаміку явищ, але й формувати нові підходи до його сприйняття. За допомогою алгоритмічного рендерингу, візуальні інтерпретації часових змін отримують новий рівень деталізації та інформативності, оскільки фрактальний підхід відкриває нові горизонти в астрономічному моделюванні, дозволяючи описувати складні часові процеси із використанням технологічних інструментів цифрової візуалізації.

У згаданих вище працях Манфреда Шредера [19] і К. Дж. Фальконера [8] піднімається проблема опису можливості створення множини у тривимірному просторі, проекції якої на площину відповідають заданим умовам. Так Кеннет Фальконер у 1987 році доводить теорему, яка відома як "теорема про цифровий сонячний годинник" або "теорема про задані проекції" [13]. Спрощено її можна сформулювати наступним чином: Нехай  $\{A_\theta\}_{\theta \in [0, 2\pi]}$  – сімейство борелівських підмножин площини  $\mathbb{R}^2$ , таких що:

- кожна множина  $A_\theta \subseteq \mathbb{R}^2$  вимірна за Лебегом.
- для майже всіх  $\theta \in [0, 2\pi]$  множина  $A_\theta$  є компактною.

Тоді існує борелівська множина  $E \subseteq \mathbb{R}^3$ , така що її ортогональна проекція  $\pi_\theta(E) = A_\theta$  для майже всіх напрямків  $\theta$ . Стосовно сонячного годинника, це означає, що можна побудувати фрактальну множину  $E$  у тривимірному просторі, тінь якої (тобто проекція) у кожний момент часу  $\theta$  буде збігатися з певним візерунком  $A_\theta$  – наприклад, цифрою, яка вказує час. Даний математичний результат підтверджує можливість створення фрактального цифрового сонячного годинника, у якому цифри змінюються залежно від положення Сонця. Практичну реалізацію концепції цифрового сонячного годинника, що використовує фрактальні структури для відображення часу пропонує Ієн Стюарт у 1991 р. [22]. Він описує гіпотетичний пристрій, який складається з "фрактальних жалюзі" або масок, що пропускають світло таким чином, щоб тінь, яку вони відкидають, формувала цифри, що змінюються протягом дня в залежності від положення Сонця. Даний концепт ілюструє, як математичні принципи фрактальної геометрії можуть бути застосовані для створення інноваційних пристроїв вимірювання часу. Не зважаючи на те, що даний пристрій мав обмеження щодо практичної реалізації через фізичні фактори, такі як дифракція світла та розмір сонячного диска, дана концепція дала поштовх подальшим дослідженням.

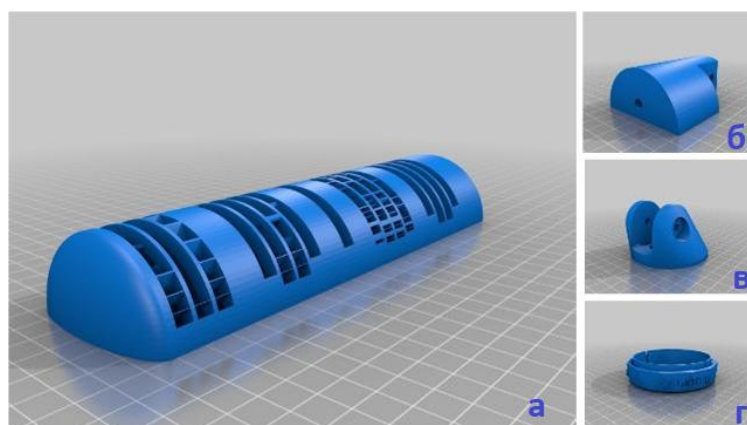
Двома ентузіастами цифрових сонячних годинників, які відповідально сприйняли праці Стюарта, були Роберт Келлог та Деніел Шарштайн. Працюючи незалежно один від одного вони створили та запатентували діючі цифрові сонячні годинники майже одночасно. Перша версія цифрового сонячного годинника Шарштайна (запатентована 31.12.1996 р.) використовує дві паралельні маски. Перша маска складається з вертикальних щілин, які створюють смугастий світловий візерунок на другій масці, що містить вузькі смуги цифр або зображень. Даний світловий візерунок освітлює лише ті смуги на другій масці, які відповідають поточному часу, створюючи його цифрове відображення [9]. У 1997 році Роберт Келлог отримав патент на цифровий сонячний годинник, який складається з гномона, підтримуючого елемента та дисплея без розмітки. Гномон має дві панелі: одну для годинних інтервалів та іншу для загальних інтервалів. Сонячне світло, проходячи через ці панелі, проектує тіні у вигляді цифр на дисплей, що змінюються протягом дня відповідно до положення Сонця [18]. Принцип дії циферблатів Келлога і Шарштайна майже ідентичний (рис.2). Келлог використовував метод проектування сонячного світла та тіні на порожню поверхню циферблату. Шарштайн додав напівпрозорий шар для миттєвого освітлення сонячним світлом, так що сам гномон стає цифровим циферблатом.



Рис. 2. Цифровий циферблат Келлога (зліва) і Шарштайна (справа)

Існували й інші схожі пристрої з цифровою візуалізацією часу. Зокрема, канадський дизайнер Деніел Вошарт з Торонто створив унікальний пристрій під назвою Sun Cube – цифровий сонячний годинник у формі куба. Він складається з 59 шарів мілбордових пластин, кожна з яких має лазерно вирізані отвори, що формують "світлові тунелі". Коли сонячне світло проходить через ці отвори, на поверхні куба з'являються цифри, які змінюються протягом дня, відображаючи поточний час [7]. Даний механізм працює завдяки точному розрахунку кутів і розташування отворів, що відповідають руху Сонця по небу. Куб Вошарта дає цифрові години з 8:00 до 18:00, він працює лише в межах 100 миль від визначеного місця і лише протягом обмеженої кількості днів (два тижні).

На нашу думку, з точки зору практичної реалізації, заслуговує на увагу гномон, який можна надрукувати на 3-D принтері, створений французьким винахідником і розробником 3-D речей Жюльєном Койном. Його розробка від 13.10.2015 р. використовує відкрите програмне забезпечення 3-D Open Scad. У відео, яке доступне англійською та французькою мовами [15] винахідник описує принцип роботи цифрового гномону, в якому сонячне світло, проходячи крізь віртуальні "світлові тунелі" у напів-циліндричному 3-D об'єкті, показує години і хвилини у вигляді світлової плями, яка відповідає шаблону чисел, які швидко змінюються кожні 20 хвилин з 10:00 до 16:00. Пристрій регулюється для будь-якої широти, та легким повертанням навколо верхнього гвинта має можливість (наближеного) налаштування до літнього часу, довготи місця або рівняння часу. Безкоштовне відкрите програмне забезпечення для друку 3-D годинника розміщене за посиланням [7]. Складові частини 3D моделі годинника, використані для друку, зображені на рис. 3.



**Рис. 3. 3D модель цифрового сонячного годинника (Пн півкуля):**  
**а) годинник – гномон; б) кріплення для гномона;**  
**в) кріплення для встановлення гномона на певну широту;**  
**г) підставка для кріплення до основи**

3D моделювання цифрового сонячного годинника містить такі етапи: створення набору координат для розташування кожної цифри відповідно до сонячної позиції у певний час; створення базового об'єму у вигляді нахиленої 3D-платформи; формування маленьких виступів або отворів (своєрідних 3D-пікселів), які або блокують, або пропускають світло; створення 3D-цифр, кожна з яких (0-9) розбивається на фрагменти (пікселі), які відкидатимуть правильну тінь у відповідний час; накладення всіх позицій у єдину модель; усунення зайвих виступів, що можуть давати неправильні тіні в інший час; моделювання шляху Сонця і перевірка, як проектується цифри у різні години; експорт моделі у формат \*.stl для 3D-друку; 3D-друк.

Слід наголосити, що процес друку годинника технологічно надзвичайно складний і навіть із швидким 3-D принтером займає час, понад півтори доби. Для отримання найчіткішого і найяскравішого зображення годинник потребує двічі на рік наступного корегування: навесні та влітку рекомендовано встановлювати кут між горизонтом і гномоном рівним  $\gamma_1 = \varphi - 10^\circ$ ; восени та взимку  $\gamma_2 = \varphi + 10^\circ$ .

Цифровий сонячний годинник було виготовлено з використанням 3D-друку – однієї з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу за даними цифрової моделі. В роботі друк цифрового сонячного годинника здійснено з використанням 3d – принтера Eро3d+, який знаходиться в лабораторії фізичних досліджень кафедри фізики, астрономії та методики викладання Рівненського державного гуманітарного університету. Даний принтер – цікава модель, виготовлена в Україні і має свої особливості в порівнянні із зарубіжними аналогами. В конструкції даного 3D принтера задіяні лінійні рейки, які в свою чергу зберігають досить високу точність позиціонування при малих габаритах і вазі. Профіль доріжок дозволяє витримувати навантаження в усіх напрямках. Завдяки такій конструкції 3D

принтер здатний друкувати без втрати якості на підвищених швидкостях. На рис. 4 зображено надрукований варіант цифрового сонячного годинника у зібраному стані.



Рис. 4. Цифровий сонячний годинник

**Висновки.** У результаті аналізу наукової літератури та прикладів практичної реалізації встановлено, що фрактальні підходи є перспективним напрямом у технологіях цифрової візуалізації часу. Завдяки властивості самоподібності та масштабної інваріантності фрактальні структури дозволяють моделювати складні часові зміни у компактній та ефективній формі. Даний підхід особливо цінний при відображенні динаміки астрономічних процесів.

Вивчення принципів побудови цифрових сонячних годинників на основі фрактальних моделей підтвердило можливість створення пристроїв, здатних візуалізувати зміну часу без використання електроніки. Приклади таких конструкцій, як годинник Роберта Келлога, кубічний сонячний годинник Деніела Вошарта чи 3D-друковані моделі, розроблені Жюльеном Койном, доводять ефективність поєднання фрактальної геометрії, оптики та комп'ютерного моделювання у створенні інноваційних інструментів для наочного визначення часу. Головним недоліком виготовленого приладу можна вважати те, що пунктирні цифри реалізуються шляхом проходження світлових променів крізь світлові тунелі, розташовані близько один до одного, що реалізуються кутом входу, рівним лише  $\pm 15^\circ$ . Оскільки протягом року Сонце у схиленні змінюється на  $\pm 23,5^\circ$ , то даний цифровий гномон, на жаль, не працюватиме, коли Сонце наближається до літнього сонцестояння (приблизно з 1 травня до 10 серпня), і так само буде гаснути взимку (приблизно з 5 листопада до 5 лютого). Як відмічалось вище, щоб мати можливість використовувати даний сонячний годинник цілий рік, його потрібно зміщувати приблизно на десять градусів кожні 6 місяців (у дні рівнодень).

Таким чином, інтеграція фрактального підходу у процес розробки астрономічного обладнання не лише розширює межі традиційної технічної думки, а й формує нову методологію цифрової візуалізації на основі математичної естетики. Подальші дослідження у цьому напрямку можуть сприяти створенню функціональних, візуально привабливих і освітньо значущих приладів, що поєднують точність, красу та наукову інноваційність.

**Конфлікт інтересів.** Автори підтверджують відсутність фінансових, особистих чи інших інтересів, що можуть розглядатися як потенційний конфлікт інтересів щодо публікації цієї статті.

**Фінансування.** Робота виконана за відсутності фінансової підтримки з боку будь-яких організацій.

**Доступність даних.** Це теоретичне дослідження не передбачає використання додаткових наборів даних.

**Використання штучного інтелекту.** Інструменти штучного інтелекту не використовувались при написанні цієї роботи.

#### Список використаних джерел

1. Грінченко В.Т., Маципура В.Т., Снарський А.О. Крок до таємниць нелінійного світу: хаос і фрактали: навч. посіб. Київ: ВПЦ "Київський університет". 2024. 416 с.
2. Коробова І.В. Компетентісно орієнтована методична підготовка майбутніх учителів фізики на засадах індивідуального підходу: монографія. Херсон: ФОП Грінь Д.С., 2016. 366 с.
3. Шарко В.Д., Коробова І.В., Гончаренко Т.Л. Нові технології в шкільній і вузівській дидактиці фізики. Херсон: ФОП Грінь Д.С., 2015. 258 с.
4. Фечук Ю., Мислінчук В. Реалізація міжпредметних зв'язків технологій та природничих дисциплін із використанням 3D моделювання. *Освіта. Інноватика. Практика*, 2024. Том 12, № 2. С. 72-78. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol12i2-011>

5. Benoit B. Mandelbrot *The Fractal Geometry of Nature*. – New York: W.H. Freeman and Company. 1983. 465 p. URL: <https://lab.semi.ac.cn/library/upload/files/2019/1/412557940.pdf>.
6. Daniel Voshart SUN CUBE (prototype). URL: <https://voshart.com/SUN-CUBE-prototype>
7. Digital Sundial. Mojoptix. 13.10.2015 p. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1068443>.
8. Falconer K.J. Digital Sundials, Paradoxical Sets, and Vitushkin's Conjecture, *The Mathematical Intelligencer*, 1987. Vol. 9, №1, pp. 24-27.
9. Hans Scharstein, Werner Krotz-Vogel, Daniel Scharstein. Digital Sundial. PN: 5,590,093. Dec. 31, 1996. US005590093A. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/63/98/85/8843b9542f1b05/US5590093.pdf>
10. Heck Andre, Perdang Jean M. *Applying Fractals in Astronomy*. Also *Lecture Notes in Physics*, IX, volume 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 1991. 210 p.p.
11. Jose Gaité Fractal analysis of the large-scale stellar mass distribution in the Sloan Digital Sky Survey. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, July 2018. pp. 2-17.
12. Jose Gaité Scale Symmetry in the Universe. MDPI. *Symmetry*. April 2020. Vol. 12(4). pp. 597-562.
13. Kenneth Falconer *Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications*. 2014. John Wiley & Sons Ltd. pp. 366.
14. Michael F. Barnsley *Fractals everywhere*. – San Diego: Morgan Kaufmann al imprint of Elsevier. 1993. 567 p. URL: <https://mate.dm.uba.ar/~umolter/materias/referencias/B.pdf>.
15. Mojoptix. ep. #001: Digital Sundial. URL: <http://www.mojoptix.com/fr/2015/10/12/ep-001-cadran-solaire-numerique>.
16. Mordvinov A.V. A Fractal Structure of the Time Series of Global Indices of Solar Activity. *Solar Physics*, July 1998. Volume 181. pp. 221-235.
17. Paul H. Coleman, Luciano Pietronero *The fractal structure of the universe*. *Physics Reports*. May 1992. Volume 213. Issue 6. pp.311-389.
18. Robert L. Kellogg Digital Sundial. PN: 5,596,553. Jan. 21 1997. US005596553A. <https://patentimages.storage.googleapis.com/8d/21/f5/b7dfd200562e9d/US5596553.pdf>
19. Schroader, *Manfired. Fractals, Chaos, Power Laws – Minutes from an Infiniti Paradise*, W.H. Freeman and Company, New York, 1991. Pp. 181-183.
20. Stephen P. Hines, N. Jackson St., Glendale, Calif *Solar clock with digital time display*. PN: 4,782,472. Nov. 1, 1988. URL: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4782472.pdf>
21. Steve Hines *First True Digital Sundial / North American Sundial Society*. Published: 24 September 2014. URL: <https://sundials.org/index.php/all-things-sundial/digital-sundials/178-first-true-digital-sundial>
22. Stewart Ian *What in Heaven is a Digital Sundial*, *Scientific American*. August 1991. Pp. 104-106.
23. Watari Shinichi *Fractal dimensions of solar activity*. *Solar Physics*, May 1995. Volume 158, pp. 365-377.

### References

1. Hrinchenko V.T., Matsypura V.T., Snarskyi A.O. *Krok do taiemnyts neliniinoho svitu: khaos i fraktaly: navch. posib*. Kyiv: VPTs "Kyivskiy universytet". 2024. 416 s. (in Ukrainian)
2. Korobova I.V. *Kompetentnisno orientovana metodychna pidhotovka maibutnikh uchyteliv fizyky na zasadakh individualnoho pidkhotu: monohrafiia*. Kherson: FOP Hrin D.S., 2016. 366 s. (in Ukrainian)
3. Sharko V.D., Korobova I.V., Honcharenko T.L. *Novi tekhnolohii v shkilnii i vuzivskii dydaktytsi fizyky*. Kherson: FOP Hrin D.S., 2015. 258 s. (in Ukrainian)
4. Feshchuk Yu., Myslinchuk V. *Realizatsiia mizhpredmetnykh zviazkiv tekhnolohii ta pryrodnychkykh dystsyplin iz vykorystanniam 3D modeliuvannia [Implementation of intersubject connections of technologies and natural disciplines using 3D modeling]*. *Osvita. Innovatyka. Praktyka – Education. Innovation. Practice*, 2024. Vol. 12, No. 2. S. 72-78. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol12i2-011> (in Ukrainian)
5. Benoit B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. – New York: W.H. Freeman and Company. 1983. 465 p. URL: <https://lab.semi.ac.cn/library/upload/files/2019/1/412557940.pdf>.
6. Daniel Voshart SUN CUBE (prototype). URL: <https://voshart.com/SUN-CUBE-prototype>
7. Digital Sundial. Mojoptix. 13.10.2015 p. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1068443>.
8. Falconer K.J. *Digital Sundials, Paradoxical Sets, and Vitushkin's Conjecture*, *The Mathematical Intelligencer*, 1987. Vol. 9, №1, pp. 24-27.
9. Hans Scharstein, Werner Krotz-Vogel, Daniel Scharstein. Digital Sundial. PN: 5,590,093. Dec. 31, 1996. US005590093A. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/63/98/85/8843b9542f1b05/US5590093.pdf>
10. Heck, Andre, Perdang, Jean M. *Applying Fractals in Astronomy*. Also *Lecture Notes in Physics*, IX, volume 3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 1991. 210 p.p.
11. Jose Gaité Fractal analysis of the large-scale stellar mass distribution in the Sloan Digital Sky Survey. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, July 2018. pp. 2-17.
12. Jose Gaité Scale Symmetry in the Universe. MDPI. *Symmetry*. April 2020. Vol. 12(4). pp. 597-562.
13. Kenneth Falconer *Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications*. 2014. John Wiley & Sons Ltd. pp. 366.
14. Michael F. Barnsley *Fractals everywhere*. – San Diego: Morgan Kaufmann, an imprint of Elsevier. 1993. 567 p. URL: <https://mate.dm.uba.ar/~umolter/materias/referencias/B.pdf>.
15. Mojoptix. ep. #001: Digital Sundial. URL: <http://www.mojoptix.com/fr/2015/10/12/ep-001-cadran-solaire-numerique>.
16. Mordvinov A.V. A Fractal Structure of the Time Series of Global Indices of Solar Activity. *Solar Physics*, July 1998. Volume 181. pp. 221-235.
17. Paul H. Coleman, Luciano Pietronero. *The fractal structure of the universe*. *Physics Reports*. May 1992. Volume 213. Issue 6. pp.311-389.

18. Robert L. Kellogg Digital Sundial. PN: 5,596,553. Jan. 21 1997. US005596553A. <https://patentimages.storage.googleapis.com/8d/21/f5/b7dfd200562e9d/US5596553.pdf>
19. Schroader, Manfred. Fractals, Chaos, Power Laws – Minutes from an Infiniti Paradise, W.H. Freeman and Company, New York, 1991. Pp. 181-183.
20. Stephen P. Hines, N. Jackson St., Glendale, Calif Solar clock with digital time display. PN: 4,782,472. Nov. 1, 1988. URL: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4782472.pdf>
21. Steve Hines, First True Digital Sundial / North American Sundial Society. Published: 24 September 2014. URL: <https://sundials.org/index.php/all-things-sundial/digital-sundials/178-first-true-digital-sundial>
22. Stewart Ian, What in Heaven is a Digital Sundial, Scientific American. August 1991. Pp. 104-106.
23. Watari Shinichi Fractal dimensions of solar activity. Solar Physics, May 1995. Volume 158, pp. 365-377.

*| Матеріал надійшов до редакції: 01.05.2025 р. | Прийнято до друку: 15.06.2025 р. | Опубліковано: 30.09.2025 р. |*

