

д. т. н, професор **Кривенко О. В.**

knuba.o.v.k@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8949-0944>

д. т. н, професор **Мартинів В. Л.**

arx.martynov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0822-1970>

Київський національний університет будівництва та архітектури

БІОНІЧНІ ПРИНЦИПИ КОЛОРИСТИКИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В СУЧАСНОМУ ЕКО-ДИЗАЙНІ ТА АРХІТЕКТУРІ

У науковій статті досліджено концептуальні засади біонічної колористики та стратегії її впровадження в сучасну архітектуру та екодизайн. Обґрунтовується необхідність переходу від традиційного використання хімічних пігментів, що характеризуються токсичністю, схильністю до фотодеградації (вицвітання), та впровадження функціональних природних систем кольороутворення. Встановлено, що в межах біонічного підходу колір розглядається не як статичний декоративний атрибут, а як динамічна система, заснована на складних фізико-хімічних закономірностях, де візуальні сигнали виступають інструментом енергообміну та екологічної адаптації.

Авторами проаналізовано три фундаментальні фізичні процеси формування кольору в біологічних системах: фотохімічне поглинання (пігментне забарвлення), фотофізична інтерференція (структурний колір) та енергозалежна емісія (біолоюмінесценція). Для наукового моделювання пігментного забарвлення використано закон Бугера–Ламберта–Бера та теорію Кубелки–Мунка, що дозволяють описувати складну взаємодію світла з багатошаровими середовищами. Особливу увагу приділено структурному забарвленню (іризації), механізм якого базується на дифракції та інтерференції світла на наноструктурах. Використання модифікованого закону Брегга-Снелла дозволяє математично обґрунтувати створення екологічно безпечних матеріалів, колір яких визначається фізичною формою поверхні, а не хімічним складом, що забезпечує їхню стійкість до знебарвлення. Розглянуто інноваційний потенціал біолоюмінесцентної колористики, зокрема використання законів кінетики Міхаеліса–Ментен для проектування енергонезалежного міського освітлення за допомогою генетично модифікованих рослин.

У висновках підкреслено, що інтеграція фізико-математичного моделювання в біоніку дозволяє перейти від традиційного «фарбування поверхонь» до конструювання світлових потоків, створюючи об'єкти

архітектури і дизайну, здатні ефективно регулювати енергетичний баланс, зменшуючи антропогенне навантаження на довкілля.

Ключові слова: *біонічна колористика; пігментне забарвлення; структурний колір; екодизайн; біоломінесценція; енергоефективність; фізико-математичне моделювання.*

Постановка проблеми. Сучасні архітектура та дизайн звертаються до біоніки як основи для створення екологічних та енергоефективних рішень. Традиційне розуміння колористики, що базується на спрощених моделях поглинання та відбиття, сьогодні піддається перегляду під впливом новітніх досліджень. Взаємодія електромагнітного випромінювання з біологічними та архітектурними структурами формує складну систему візуальних сигналів, де колір виступає не лише як естетичний елемент, а як функціональний інструмент енергообміну та екології. Наприклад, традиційне використання фарб супроводжується значними екологічними витратами: від токсичності компонентів (діоксид титану, свинець) до потреби у постійному оновленні через вицвітання. Натомість природні механізми утворення кольору пропонують довговічність та можливості для саморегуляції. Отже, наукову актуальність представляє собою концепція біонічної колористики, яка розглядає колір не як статичний декоративний атрибут, а як динамічну систему, що базується на складних фізико-хімічних закономірностях кольороутворення у природі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роль колористики як функціонального та психологічного регулятора середовища проаналізована у посібнику [1]. Дослідники С. Хіао та D. Seong у [2] класифікують біоміметичні механізми колористики на пігментні, структурні та біоломінесцентні, вказуючи на потенціал структурного кольору (іризації) у створенні екологічно безпечних матеріалів без використання токсичних барвників. Наукова робота [3] представляє методи отримання стійких структурних кольорів через фазовий поділ полімерів, що відкриває шлях до екологічно чистого виробництва кольору без пігментів. Питання застосування структурного кольору як альтернативи пігментам вивчені у статті [4]. Незважаючи на розвиток досліджень з питань біонічних колірних систем, потреба в їх систематизації та аналізі для подальшого впровадження у проектні рішення архітектури та екодизайну, обумовлює актуальність обраної теми статті.

Формулювання цілей та завдання статті. Метою дослідження є аналіз фізико-математичних моделей формування кольору в природних системах для вирішення задач біонічної колористики в сучасному екодизайні та архітектурі.

Основна частина. Колір у природі відіграє важливу роль для живих організмів, впливаючи на їхнє виживання, поведінку та еволюцію. У природі колір не є статичною ознакою, він динамічно адаптується до зовнішніх умов. Біонічна колористика розглядає колір як результат складної взаємодії світла з матерією на мікро- та нанорівнях. Утворення кольору у біологічних системах є результатом трьох фундаментально різних фізичних процесів: фотофізичної інтерференції (структурний колір), фотохімічного поглинання (пігментний колір) та енергозалежної емісії (біолоюмінесценція).

Для класифікації біонічних рішень визначимо основні механізми формування кольору в природі (див. Таблицю 1).

Таблиця 1

Механізми формування кольору в природних системах

Тип забарвлення	Фізичний механізм/ оптичні характеристики	Функціональна перевага	Приклади в природі
Пігментне	Селективне поглинання фотонів молекулами фарбника (хлорофіл, меланін тощо)/ кутово-незалежний колір, зазвичай матовий	Енергозабезпечення (фотосинтез), природні барвники	Листя рослин, шкіра ссавців
Структурне	Інтерференція та дифракція на наноструктурах / іризація, металевий блиск, зміна кольору залежно від кута	Висока яскравість, стійкість до вицвітання, кутова залежність	Крила метелика Morpho, пір'я павича
Біолоюмінесцентне	Хімічна реакція окислення (люциферин-люцифераза)/ емісія (випромінювання) видимих фотонів	Автономне освітлення у темряві, комунікація	Глибоководні риби, світляки, гриби

Пігментне забарвлення базується на здатності молекул, які продукуються самими живими організмами вибірково поглинати й відбивати хвилі різних частот, що сприймається оком як колір. Конкретний спектр поглинання залежить від молекулярного складу пігменту та міжатомних відстаней у його структурах. Наприклад, хлорофіл ефективно поглинає синю та червону частини спектра для фотосинтеза, тоді як зелене світло відбивається, формуючи візуальний образ рослин.

Для моделювання ідеально прозорих та однорідних середовищ із незначним розсіюванням застосовується закон Бугера–Ламберта–Бера. Він описує лінійну залежність між рівнем поглинання світла (абсорбцією), концентрацією речовини та товщиною шару, через який проходить випромінювання. Проте, як доводить автор дослідження [5], колір біологічної пелюстки або сучасної фарби з наповнювачами є набагато

складнішим результатом взаємодії поглинання пігментами та зворотного розсіювання світла внутрішніми неоднорідностями. У своїй праці автор використовує теорію Кубелки–Мунка для моделювання поглинальних та розсіювальних середовищ, де відбиття світла R описується через коефіцієнти поглинання K та розсіювання S (визначається розміром частинок пігменту та їхнім показником заломлення відносно основи). Жива тканина розглядається як багатошаровий стек (стопка), де кожен шар (епідерміс, мезофіл) має унікальні характеристики. Ефективність колірної фільтрації прямо залежить від локалізації та густини пігменту, тоді як яскравість та насиченість кольору забезпечуються мезофілом — шаром, що інтенсивно розсіює світло.

Прикладом застосування пігментної колористики у біодизайні є «BIQ House» (Гамбург, 2013), де скляний фасад заповнений мікродоростями, що змінюють колір від прозорого до насиченого зеленого залежно від сонячної активності, забезпечуючи адаптивне затінення та комфортний мікроклімат у приміщенні без використання штучних штор чи жалюзі.

Структурне забарвлення має особливу цінність для біонічної колористики — структурні кольори не знебарвлюються та мають блискучу візуальну привабливість переливу. Формування кольору залежить не від хімічних властивостей молекул, як це відбувається з пігментами, а від структури поверхні, на яку падає світло. Структурний (інші назви - іридесценція або іризація) механізм утворення кольору заснований на фізичних процесах та залежить від мікроструктури поверхонь, на яку падає світло від джерела, що викликає дифракцію або інтерференцію світла. Як зазначається у [6], у всіх випадках основою іризації служать наноструктури у формі ребер, волокон, пластинок, організованих в регулярно розташовані ряди або решітки (у фізиці структури такого типу називають фотонними кристалами), див. рис.1.

Структури по-різному розсіюють кольори світла та створюють інтерференційні ефекти. Оскільки світло, що відбивається від верхньої частини структурного кольорового шару, може бути не у фазі зі світлом, що відображається знизу, колір може здаватися яскравішим або зміщуватися по відтінку під час перегляду під різними кутами. Тому структурні кольори, на відміну від статичних пігментних, мають властивість динамічності. Вони м'яко змінюються залежно від освітлення та положення спостерігача, що створює ефект «живого простору».

Модифікований закон Брегга (закон Брегга-Снелла) є фундаментальним для біонічної колористики, оскільки він пояснює, як саме фізична структура нанорівня створює колір без використання хімічних фарбників. На відміну від класичного закону Брегга, який описує дифракцію хвиль у монолітних кристалах, модифікована версія враховує особливості біологічних багатошарових структур (наприклад, крил

метелика *Morpho*, див. рис.1, С), що складаються з шарів різних матеріалів із різними показниками заломлення.

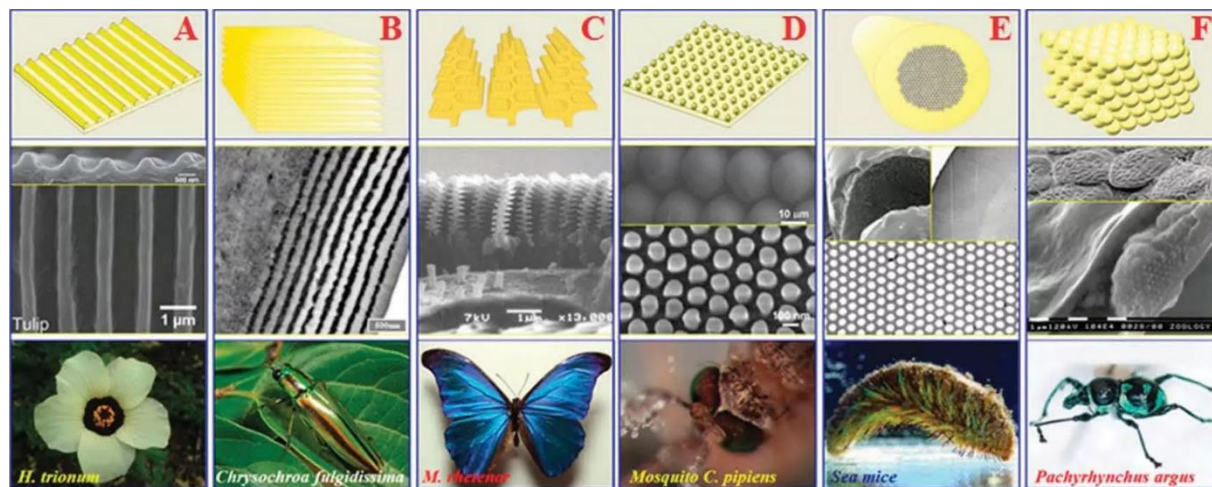


Рис. 1. Приклади структурних кольорів у природі [6]: А - гібіскус трійчастий (*Hibiscus trionum*); В - жук тамамусі (*Chrysochroa fulgidissima*); С - метелик виду *Morpho rhetenor*; D - комар звичайний (*Culex pipiens*); Е - морська миша (*Aphrodita aculeata*); F - жук виду *Pachyrhynchus argus*.

Структурна колористика має високий ступінь природної ефективності, адже вона дозволяє досягати візуальної яскравості за мінімальних матеріальних витрат. Впровадження цих принципів у дизайн та архітектуру відкриває шлях до створення екологічно безпечних матеріалів, які не потребують токсичних барвників і мають стійкість до знебарвлення, оскільки їхній колір визначається фізичною формою, а не стійкістю молекул. Технологічна реалізація цього напрямку базується на цифровому моделюванні та адаптивному проектуванні, що дозволяє відтворювати складні біологічні мікроструктури. У статті [7] аналізується практичний досвід як у сучасних хмарочосах використовують структурне забарвлення для досягнення практичних цілей.

Біолоюмінесцентна колористика оперує відбитими хвилями або фотолоюмінесценцією та фокусується на біолоюмінесценції — емісії світла в результаті внутрішньої енергозалежної хімічної реакції. Ключовою відмінністю такого випромінювання є його автономність, що не потребує зовнішнього опромінення.

Кожен біолоюмінесцентний організм має свій характерний колір, що визначається енергетичним станом молекул-люмінофорів. Згідно із законом випромінювання Планка, колір (або довжина хвилі) та спектральна інтенсивність світла залежать від того, як розподіляється енергія всередині джерела. У природних системах цей закон пояснює, чому ми бачимо конкретну «колірну температуру». Наприклад, глибоководні риби випромінюють переважно синє світло, оскільки воно має найвищу енергію та здатність поширюватися у воді.

Колір біоломінесценції не є статичним, він може змінюватися залежно від того, у якому стані перебуває клітина. Відповідно до рівняння Ліпперта–Матаги, існує пряма залежність між полярністю оточення молекули та кольором, який вона випромінює. Це дозволяє використовувати колір як точний датчик фізичного стану клітини.

Яскравість і тривалість спалаху світла регулюються швидкістю хімічної реакції між ферментом (люциферазою) та субстратом (люциферином). Цей процес описується законами кінетики Міхаеліса–Ментен. Згідно з цими закономірностями, інтенсивність світіння прямо залежить від насиченості системи «паливом» (субстратом). Коли концентрація речовини висока, реакція досягає своєї максимальної швидкості, і ми спостерігаємо найяскравіший спалах. Як тільки запаси вичерпуються або активність ферменту гальмується, світло плавно згасає. Ця закономірність дозволяє створювати біосенсиори, де яскравість світіння кількісно вказує на наявність певних речовин у середовищі.

Практичне застосування біоломінесцентної колористики у сфері сталого дизайну відкривають шлях до створення енергонезалежного міського освітлення за допомогою генетично модифікованих рослин. Прикладом такого прориву є розробка китайських науковців [8], які представили «рослини-аватари», здатні до яскравого самостійного світіння. Використовуючи модифіковану грибкову систему, яка перетворює кофейнову кислоту на люциферин, ці рослини забезпечують стабільний світловий потік без електроенергії. Імплементация таких «живих ліхтарів» у міський ландшафт дозволяє не лише скоротити споживання електрики, а й знизити світлове забруднення. Таким чином, синтез фізики випромінювання та біохімічної кінетики перетворює біоломінесценцію з природного феномену на керований інструмент архітектури та екодизайну.

Висновки. Проведений у статті аналіз показує, що традиційні підходи до використання кольору в архітектурі та дизайні є спрощеними у порівнянні з природними. Природа не використовує колір як статичну властивість поверхні, а створює оптичні системи, де кожен фотон проходить складний шлях через фільтри, відбивачі та розсіювачі.

Розуміння ролі розсіювання, багатошаровості та нелінійної взаємодії світла з неоднорідними середовищами надають можливості для розвитку. А застосування фізико-математичного моделювання в біонічній колористиці дозволяє не лише копіювати природні кольори, а й програмувати функціональні властивості різних поверхонь у біодизайні – їхню здатність пропускати світло, відбивати тепло або змінювати відтінок залежно від стану біосистеми. Для рішень біодизайну це означає перехід від "фарбування поверхонь" до "конструювання світлових потоків", коли більш глибоке розуміння природного кольору дає ключ до створення рішень нового покоління. Це фарби, що не вицвітають, поверхні які дихають і світяться, мінімізуючи антропогенне навантаження на довкілля.

Література

1. Прищенко С. В. Кольорознавство: навч. посібник / за ред. Є. А. Антоновича. Київ: ДАКККіМ, 2009. 358 с.
2. Xiao C., Seong D. Research on the Application of Biomimetic Design in Art and Design. *Biomimetics*. 2025. Vol. 10, iss. 8. 541. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics10080541>
3. Sicher A., Ganz R., Menzel A. M., Messmer D., Panzarasa G., Feofilova M. A., Prum R. O., Style R. W., Saranathan V., Rossi R. M., Dufresne E. R. Structural color from solid-state polymerization-induced phase separation. *Soft Matter*. 2021. Vol. 17, iss. 23. P. 5772–5779. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1SM00210D>
4. Saito A. (2012). Material design and structural color inspired by biomimetic approach. *Science and technology of advanced materials*, 12(6), 064709. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/6/064709>
5. Van der Kooi C. J., Elzenga J. T. M., Staal M., Stavenga D. G. How to colour a flower: on the optical principles of flower coloration. *Proc Biol Sci*. 2016. Vol. 283 (1830). 20160429. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0429>
6. Sun J., Bhushan B., Tong J. Structural coloration in nature. *RSC Adv*. 2013. Vol. 3, iss. 35. P. 14862–14889. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3RA41096J>
7. Krivenko O., Pylypchuk O., Avdieieva N., Avdieieva M., Bieber S. Biomimetic approaches to color formation in ecological architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1150: International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2021), 12–14 March 2021, Jeju Island, Korea. 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1150/1/012007>
8. Chinese scientists unveil glowing 'Avatar-like' plants that could light cities without electricity. *Euronews Next*. 2026. April 2. URL: <https://www.euronews.com/next/2026/04/02/chinese-scientists-unveil-glowing-avatar-like-plants-that-could-light-cities-without-elect> (дата звернення: 04.05.2026)

References

1. Pryshchenko, S. V. (2009). *Koloroznavstvo: navch. posibnyk [Color science: a study guide]* (Ye. A. Antonovych, Ed.). DAKKKiM {in Ukrainian}
2. Xiao, C., & Seong, D. (2025). Research on the Application of Biomimetic Design in Art and Design. *Biomimetics*, 10(8), 541. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10080541> {in English}
3. Sicher, A., Ganz, R., Menzel, A. M., Messmer, D., Panzarasa, G., Feofilova, M. A., Prum, R. O., Style, R. W., Saranathan, V., Rossi, R. M., & Dufresne, E. R. (2021). Structural color from solid-state polymerization-induced phase separation. *Soft Matter*, 17(23), 5772–5779. <https://doi.org/10.1039/D1SM00210D> {in English}

4. Saito, A. (2012). Material design and structural color inspired by biomimetic approach. *Science and Technology of Advanced Materials*, 12(6), 064709. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/6/064709>
5. Van der Kooi, C. J., Elzenga, J. T. M., Staal, M., & Stavenga, D. G. (2016). How to colour a flower: On the optical principles of flower coloration. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1830), 20160429. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0429>
6. Sun, J., Bhushan, B., & Tong, J. (2013). Structural coloration in nature. *RSC Advances*, 3(35), 14862–14889. <https://doi.org/10.1039/C3RA41096J>
7. Krivenko, O., Pylypchuk, O., Avdieieva, N., Avdieieva, M., & Bieber, S. (2021). Biomimetic approaches to color formation in ecological architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1150(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1150/1/012007>
8. Euronews Next. (2026, April 2). *Chinese scientists unveil glowing 'Avatar-like' plants that could light cities without electricity.* <https://www.euronews.com/next/2026/04/02/chinese-scientists-unveil-glowing-avatar-like-plants-that-could-light-cities-without-elect>

Doctor of Engineering Sciences, Professor **Krivenko O.**
knuba.o.v.k@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8949-0944>

Doctor of Engineering Sciences, Professor **Martynov V.**
arx.martynov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0822-1970>

Kyiv National University of Construction and Architecture

BIONIC PRINCIPLES OF COLORISTICS AND THEIR APPLICATION IN MODERN ECO-DESIGN AND ARCHITECTURE

Abstract. *The scientific article explores the conceptual foundations of bionic coloristics and strategies for its implementation in modern architecture and eco-design. The authors justify the necessity of transitioning from the traditional use of chemical pigments—characterized by toxicity and susceptibility to photodegradation (fading)—to the implementation of functional natural systems of color formation. It is established that within the bionic approach, color is viewed not as a static decorative attribute, but as a dynamic system based on complex physico-chemical regularities, where visual signals serve as a tool for energy exchange and ecological adaptation.*

The authors analyze three fundamental physical processes of color formation in biological systems: photochemical absorption (pigment coloration), photophysical interference (structural color), and energy-dependent emission (bioluminescence). For the scientific modeling of pigment coloration,

the Beer–Lambert–Bouguer law and the Kubelka–Munk theory are utilized, enabling the description of complex light interaction with multilayered plant media. Particular attention is paid to structural coloration (iridescence), the mechanism of which is based on light diffraction and interference on nanostructures. The application of the modified Bragg-Snell law allows for the mathematical substantiation of creating ecologically safe materials, where color is determined by the physical form of the surface rather than its chemical composition, ensuring resistance to fading. The innovative potential of bioluminescent coloristics is considered, specifically the use of Michaelis–Menten kinetics for the design of energy-independent urban lighting using genetically modified plants.

The conclusions emphasize that the integration of physico-mathematical modeling into bionics enables a shift from traditional "surface painting" to the "construction of light flows," creating architectural and design objects capable of effectively regulating energy balance while reducing anthropogenic impact on the environment.

Keywords: bionic coloristics; pigment coloration; structural color; eco-design; bioluminescence; energy efficiency; physico-mathematical modeling.