



2024. Номер 9, С. 45 – 53

Отримано: 08.04.2024 Перевірено: 22.04.2024 Прийнято: 29.04.2024

DOI: 10.5281/zenodo.12665123

UDC 004.02:556.01:616

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF PREDATORS ON THE PROTECTIVE COLORATION OF CARP BY THE CORRELATION PLEIADS METHOD (CYPRINUS CARPIO)

Yu. Bepalov¹, I. Hnoievyi², O. Hryhoriev², T. Klochko³, I. Bereshko³

¹*Kharkiv National University named after V.M. Karazin*

²*Kharkiv State Biotechnological University*

³*National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "KHAI"*

Annotation. Within the scope of this work, we are talking about the effect on the system colorimetric parameters, the values of which can be obtained by computer processing of digital images of animals obtained from the drones. Namely, about the effect on the system colorimetric parameters, which reflect the diversity and alignment of the protective coloring of animals, as well as the degree of dominance of the red component. The colors with which animals are painted perform various adaptive functions: camouflage, intraspecific communication (in particular, in the context of sexual selection). Fish have body color that camouflages them in the natural environment. This helps them hide from the press of predators. Weakening the effect of the predator reduces the adaptive value of the protective coloration of the victim with a certain change in the system colorimetric parameters, the value of which provides an adaptive, masking effect with a corresponding change in the effect on the system colorimetric parameters of the protective coloration of animals of stabilizing selection. The work was performed on freely available material, namely digital photos of the wild form of *Cyprinus carpio* in the natural environment. Using the method of correlation pleiads and system parameters of the following two size-age groups of fish: fry (size less than 50 mm, on which the effect of predators is maximal) and adult sexually mature individuals (size more than 500 mm, on which the effect of predators is minimal) results were obtained that allow propose a new approach to remote determination of signs of changes in the nature of the impact of predators on prey. It also allows to assess the risks of population outbreaks of certain animal species. We are talking about signs, the role of which is performed by the system colorimetric parameters of the coloring of the natural predator-prey link. The search for regularities in the influence of predators on the protective coloration of carp (*Cyprinus carpio*), is underway.

Key words: *bursts of abundance, stabilizing selection, digital images, carp, drones.*

МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ПЛЕЯД ВПЛИВУ ХИЖАКІВ НА ПРОТЕКТУЮЧЕ ЗАБАРВЛЕННЯ КОРОПА (*CYPRINUS CARPIO*)**Ю.Г. Беспалов¹, І.В. Гноєвий², О.Я. Григорєв²,
Т.О. Клочко³, І.М. Берешко³**¹Харківський Національний Університет ім. В.М. Каразіна, ст.наук.співроб.,
y.bespalov@karazin.ua²Харківський Державний біотехнологічний університет
hgzva1810.1965@gmail.com, kharkovzoo2010@gmail.com³Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»
t.klochko@khai.edu, i.bereshko@khai.edu

Анотація. Досліджено дію на системні колориметричні параметри, значення яких можливо отримати шляхом комп'ютерної обробки цифрових зображень тварин, отриманих з дронів, що відбивають розмаїття та вирівнювання захисного протектуючого забарвлення тварин, а також, ступінь домінування в ньому червоної складової. Кольори, якими забарвлені тварини, виконують різні адаптивні функції: маскування, внутрішньовидового спілкування (зокрема, у контексті статевого відбору). Риби мають колір тіла, який маскує їх у природному середовищі. Це допомагає їм ховатися від хижаків. Послаблення дії хижака зменшує адаптаційне значення захисного протектуючого забарвлення жертви з певною зміною системних колориметричних параметрів, значення яких забезпечує адаптаційний, маскуючий ефект з відповідною зміною дії на системні колориметричні параметри захисного протектуючого забарвлення тварин стабілізуючого відбору. Робота виконана на матеріалі, викладеному у вільний доступ, а саме цифрових фото дикої форми *Cyprinus carpio* у природному середовищі. З використанням методу кореляційних плеяд та системних параметрів наступних двох розмірно-вікових груп риби: мальків (розміром менше 50 мм, дія на яких хижаків максимальна) та дорослих статевозрілих особин (розміром більше 500 мм, дія на яких хижаків мінімальна) отримані результати, які дозволяють запропонувати новий підхід до дистанційного визначення ознак зміни характеру впливу хижаків на жертву. Ознаки, роль яких виконують системні колориметричні параметри забарвлення природної ланки хижак-жертва. Це дозволяє оцінювати також ризики спалаху чисельності популяцій певних видів тварин. Ведеться пошук закономірностей впливу дії хижаків на захисне протектуюче забарвлення коропа (*Cyprinus carpio*).

Ключові слова: спалахи чисельності, стабілізуючий відбір, цифрові зображення, короп, дрони.

Вступ. Актуальність теми визначається наявністю ризику загроз біобезпеці, які виникають внаслідок порушень екологічної стабільності. В межах даної роботи йдеться про порушення екологічної стабільності, що викликане критичними змінами характеру дії хижаків на тварин, які є жертвами цих хижаків. В умовах глобальних кліматичних змін такі ризики виникають все частіше. Вони можуть бути викликані і безпосередньо діяльністю людини. Резонансний приклад того маємо у зоні бойових дій в Україні 2023 року. З цієї зони зникли природні вороги домових мишей – лисиці, тхори, сови, тощо. Внаслідок чого маємо катастрофічний спалах чисельності популяції домових мишей, які є носіями небезпечних інфекційних хвороб. Тож катастрофічний спалах чисельності мишей створює джерело загроз біобезпеці не лише для України, але й для Європи у цілому. Джерела цих загроз можуть бути розташовані на великих площах, іноді – важкодоступної місцевості. Тому перспективність використання аерокосмічних засобів для дистанційної реєстрації

ознак зміни характеру дії хижаків на тварин, які є їхніми жертвами, набуває великого значення. Зокрема мова може йти про таку реєстрацію багатьох видів тварин, включаючи корошових риб, шляхом обробки їх цифрових зображень, отриманих з а допомогою дронів.

Нині глобальні кліматичні зміни створюють для людства великі проблеми, часто з утворенням ризику загрози біобезпеці планети (Cummings et al., 2021; Zavriev, 2015; Hulme et al., 2023). Ці ризики часто пов'язані з порушеннями екологічної стабільності. Зокрема такими, що їхньою проявою є відсутність стабілізуючого впливу хижаків на популяцію тварин, які для цих хижаків є жертвою. Можна навести досить великий перелік таких прикладів, коли чисельність окремих видів у природі різко збільшувалась зі зміною характеру наслідків цього тиску на маркери дії стабілізуючого відбору на популяцію виду тварин, оскільки вони є жертвами хижаків (Sugimoto, 2002). Тож визначення цих маркерів є засіб прогнозування певних аспектів біобезпеки. Наслідками глобальних кліматичних змін часто є критичні зміни стану водоймищ та водотоків, різного або протилежного за напрямком характеру, з відповідними змінами умов існування гідробіонтів (Coutinho & Prado, 2015; Nobre et al., 2016; Pangestu, 2023).

Вельми важливою з різних точок зору групою гідробіонтів є риби. Зазначимо, що риби, у популяції яких тиск хижаків на старші, більші розмірно-вікові групи, менший, ніж на молодші, є вельми зручним об'єктом для вивчення і пошуку таких маркерів. У випадку риб характер впливу хижаків на жертви має значення для рибопродуктивності озер та водосховищ (Svitačová et al. 2023). Стан галузі рибництва у світі є важливою складовою продовольчої безпеки і викликає останнім часом занепокоєння (Pauly & Zeller, 2016).

В Україні важливу роль для продовольчого забезпечення населення відіграє короп (*Cyprinus carpio*). Маємо на увазі культурну форму цієї риби у ставковому рибозоведенні, а також і дику форму, оскільки вона є об'єктом промислового рибальства (Lyach, 2020; Colvin et al., 2012; Suprayudi et al., 2022).

На матеріалі протекуючого забарвлення дикої форми цієї риби шляхом математичного моделювання методом кореляційних плеяд отримані результати даної роботи.

Для визначення маркерів зміни характеру тиску хижаків на тварин, що є їхніми жертвами, потрібен збір фактичного матеріалу на великих площах місцевості. Іноді – важкодоступної місцевості. Тому маємо перспективу для практичного вирішення згаданої проблеми – використання дронів. Конкретніше – аналіз цифрових зображень, отриманих за допомоги апаратури, яка входить до звичайної, стандартної комплектації постачання найбільш поширених та відносно дешевих модифікацій дронів. Наявний парк яких, у разі негайної потреби у екстремальній ситуації, може бути досить швидко мобілізований.

Предметом даної роботи є новий підхід до пошуку маркерів послаблення тиску хижаків на жертву. Підхід передбачає математичне моделювання методом кореляційних плеяд певних системних колориметричних параметрів протекуючого забарвлення тварин. Можливість використання згаданого підходу до аналізу протекуючого забарвлення тварин використали на прикладі *Cyprinus carpio*. Зокрема – для прогнозування спалахів їхньої чисельності, яке мало місце в деяких районах США (Snow et al., 2020).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Напрямоком аналізу останніх досліджень і публікацій був пошук даних щодо певних аспектів структури захисного протекуючого забарвлення тварин (ПЗТ). А саме аспектів, які забезпечують захист жертви від хижака. І відповідно – мають певний вираз у характері ПЗТ. Мова йде характер ПЗТ, який маємо як результат стабілізуючого відбору. Маємо на увазі стабілізуючий відбір, як наслідок тиску хижака на жертву. Послаблення, або ж повна відсутність цього тиску стануть результатом відповідної зміни певних аспектів ПЗТ. Йдеться про аспекти, що відіграють адаптивну роль у маскуванні жертви і які втрачають цю свою роль зі зникненням, або суттєвим послабленням тиску хижаків на жертву з відповідними проявами у наслідках впливу стабілізуючого відбору на ПЗТ жертви. Реєстрація таких змін може бути використана для прогнозування спалахів чисельності популяцій деяких видів тварин, включаючи риб.

Йдеться про спалахи чисельності, викликані зменшенням, або ж – повним зникненням, тиску на ці види тварин хижаків – їхніх природних ворогів. Мова може йти, зокрема, про зміни певних аспектів ПЗТ, що вони будуть зареєстровані шляхом комп'ютерного аналізу цифрових зображень тварин. Зокрема – цифрових зображень, отриманих з борту дронів. Згадані зміни аспектів ПЗТ можуть розглядатися як системні маркери (СМ) зменшення, аж до цілковитого зникнення, тиску на певні види тварин хижаків, як маркери ризику спалахів чисельності популяцій цих тварин.

У науковій праці (Panayotova & North, 2018) подано широкий спектр результатів досліджень щодо різних аспектів формування ПЗТ в онтогенезі і філогенезі разом з аспектами щодо стратегій функціонування ПЗТ. Для предмета даної роботи цікавими є аспекти впливу на забарвлення риб кліматичних змін (Vissio et al., 2021). А також нейроендокринних аспектів забарвлення риб в умовах аквакультури, в яких фактор хижаків практично відсутній (Duarte et al., 2017). Для пошуку СМ стають у нагоді матеріали праці (Vittadello et al., 2021) стосовно стратегій функціонування плямистих та строкатих (камуфляжних) ПЗТ.

Математичне моделювання різних аспектів виникнення таких форм ПЗТ, а також адаптаційних стратегій їхньої маскуючої дії є нині важливим напрямком біологічних досліджень Green (2021), започаткованих піонерськими працями Еддісона Емері Верілла, Френсіса Самнера та Алана Тьюрінга (Verrill (1897), Sumner (1935), Turing (1952)). У праці Duarte et al. (2017) висвітлені механізми маскуючої дії таких ПЗТ. Вони значною мірою визначені ефектом руйнації цілісного зорового сприйняття силуету тварини за рахунок злиття за кольором частини плям ПЗТ з фоном місцевості (Choi et al., 2020). Такий механізм потребує певного розмаїття колориметричних параметрів (КП) притаманного тварині ПЗТ. У випадку, коли фон значною мірою створює порівняно проста рослинна спільнота на місцевості, мова повинна йти про кольорове розмаїття, яке визначає динаміку у часі відомої моделі сукцесії Маргалєфа (ММС) (Margalef, 1967). У праці Беспалова Ю.Г. та співавторів (Bespalov et al., 2017) презентовані результати формалізованого опису притаманної ММС динаміки КП. У цій же ж праці презентований робочий прийом *рехронізації*. Він базується на припущенні, що динаміка певної множини модельованих систем має у собі однакові фази, які реалізуються у однаковій послідовності, але на момент реєстрації системи з цієї множини знаходяться на різних фазах своєї динаміки. Рехронізація дозволяє дати формалізований опис динаміки певної множини систем на основі даних реєстрації, здійсненої в один момент часу. Для предмету даної роботи важливо, що згідно з результатами праці Bespalov et al. (2017) динаміка КП, притаманних ММС, може бути змодельована з використанням результатів комп'ютерного аналізу компонентів RGB – моделі цифрових фото.

З урахуванням сказаного про ідеологію рехронізації можна вести мову про розмаїття КП рослинного фону не лише у часі, але й у просторі, до якого розмаїття повинно бути пристосоване розмаїття різнокольорових плям і смуг ПЗТ (Luo et al., 2021). Згідно з концепцією оптимального розмаїття (Bukvareva & Aleshchenko, 2013) і в біологічній системі ПЗТ можемо спостерігати обмеження розмаїття, викликані дефіцитом певного ресурсу. Роль такого ресурсу зокрема відіграє кутовий розмір силуету тварини, на якому може бути розміщено обмежену кількість достатнього розміру різноколірних плям ПЗТ. Це обмежує реальні значення розмаїття ПЗТ. Маємо на увазі розмаїття, яке забезпечує у будь-якій точці простору та часу злиття за кольором частини плям ПЗТ із частиною рослинного фону з забезпеченням маскуючого ефекту тварини та руйнації цілісного сприйняття силуету тварини.

У праці Bespalov et al. (2021) презентовано концепцію, згідно з якою дефіцит розмаїття ПЗТ може бути компенсований його вирівнюванням. Йдеться про вирівнювання між зеленою та червоною складовими ПЗТ. За рахунок якого може бути не досконало, проте задовільно реалізований ефект злиття за кольором з рослинним фоном плям ПЗТ у будь-якій точці часу і простору розвитку ММС.

За певних умов маскуючий ефект ПЗТ може бути підсилений за рахунок зсуву відносин між червоною та зеленою складовою відповідно від домінуючої у фоні складової.

Доцільною вважаємо робочу гіпотезу, згідно з якою вплив хижака на жертву шляхом стабілізуючого відбору призведе до певного оптимального співвідношення у ПЗТ жертви розмаїття, вирівнювання та зсуву у зелену чи червону складову. Йдеться про ПЗТ популяції, сформованого внаслідок стабілізуючого відбору. Маркером відсутності впливу хижака буде зміна характеру цього співвідношення. Водночас така зміна може бути маркером загрози вибуху чисельності популяції жертви.

Мета роботи. Метою даної роботи є деталізація вищевикладеної робочої гіпотези з використанням результатів математичного моделювання ПЗТ. Йдеться мова про моделювання методом кореляційних плеяд з елементами сучасної інтерпретації можливостей цього метода (Yadav, 2018, Haber Dworkin, 2017) з подальшою перевіркою робочої гіпотези на фактичному матеріалі ПЗТ різних розмірно-вікових груп дикої форми *Suprinus carpio*. За результатами такої деталізації та перевірки планується розробка на основі цієї робочої гіпотези дослідницького прототипу процедури визначення ризику спалаху чисельності популяції певного виду тварин. Йдеться мова про процедуру, що базується на комп'ютерному аналізі компонентів RGB-моделі цифрового зображення. Процедура, що може бути використана у автоматичних або автоматизованих системах дистанційної реєстрації ризиків спалахів чисельності популяції певних видів тварин.

Завдання досліджень:

- пошук маркерів розмаїття та вирівнювання КП, притаманних ПЗТ дикої форми *Suprinus carpio*; тобто маркери, значення яких може бути отримане шляхом комп'ютерного аналізу компонентів RGB-моделі цифрового зображення риби.

- пошук відношень між значеннями щойно названих КП, що можуть слугувати маркерами різного ступеню пресингу хижаків на різні розмірно-вікові групи *Suprinus carpio*; а також можуть бути використані у автоматичних або автоматизованих системах дистанційної реєстрації ризиків спалахів чисельності *Suprinus carpio* або популяції інших видів тварин.

Матеріал і методи досліджень. Дослідження базувалися на аналізі фактичного матеріалу цифрових зображень особин дикої форми *Suprinus carpio*, викладених у вільний доступ. Аналізувалося шість цифрових фото мальків, розміром менше 50 мм, порівняно сильно вразливих для пресингу хижаків (далі – «мальки»), та шість цифрових фото статевозрілих особин, розміром більше 500 мм, порівняно мало вразливих для пресингу хижаків (далі – «дорослі»). Такий розмір вибірок робить можливим обробку матеріалу за допомогою точного методу Фішера (ТМФ) для малих вибірок з визначенням статистичної значущості різниці у частоті спостережень певних якісних ефектів у цих вибірках.

Згадані цифрові зображення аналізувалися за допомогою програмного пакету, розробленого на мові PYTHON, який дозволяє визначити і помістити у таблиці значення RGB-компонентів кожного пікселя зображення і далі транспортувати ці таблиці у будь який програмний засіб для статистичної обробки. Внаслідок такої обробки на першому кроці отримувалися значення колориметричних параметрів (КП), притаманних природному забарвленню тварин (ПЗТ) дикої форми *Suprinus carpio*. КП, що відповідають таким у динаміці Маргалєфової моделі сукцесії (ММС). На другому кроці для вибірки мальків і вибірки дорослих визначалися значення коефіцієнту кореляції за Пірсоном між значеннями цих КП. За результатами визначення будувалися, окремо для вибірок мальків і дорослих, кореляційні плеяди (Suniti Yadav, 2018).

За результатами порівняльного аналізу кореляційних плеяд відбиралися аспекти їхньої структури, що можуть слугувати маркерами зміни у силі пресингу хижаків на *Suprinus carpio*. А в більш узагальненому сенсі – маркерами ризику спалаху чисельності популяції певних тварин, викликаного зменшенням тиску на цю популяцію хижаків.

Результати досліджень та їх обговорення. Згідно зі змістом сформульованою вище мети дослідження на початкових кроках деталізувалася робоча гіпотеза. На першому кроці

були конкретизовані значення КП, притаманних ПЗТ *Cyprinus carpio*, отримані шляхом аналізу компонентів RGB-моделі цифрових зображень дикої форми *Cyprinus carpio* з вибірок мальків та дорослих. Був також конкретизований екологічний зміст цих КП – у відповідності до певних фаз ММС. Йдеться про фази, що мають відрізнятися видом КП рослинного фону. Результати першого кроку конкретизації робочої гіпотези презентовані у табл. 1.

У наших розрахунках прибутку ми знехтували урахуванням різниці в сплаті податків за продаж продукції у країні-виробнику та країні-споживачу. Податок на додану вартість (ПДВ) у кожній з країн-споживачів хоч і різний, але лежить у проміжку 19-25 %, що досить близько до ПДВ в Україні – 20 %. Слід зазначити, що у деяких країнах ЄС діють понижені податки на продукти харчування. Втім, оскільки ми порівнюємо ціни вже з урахуванням податків у всіх випадках, на наші розрахунки різниця в ПДВ суттєво не впливає (Mengden, 2024).

На другому кроці були конкретизовані присутні у робочій гіпотезі значення коефіцієнтів кореляції, що можуть виконувати функції маркерів розмаїття, вирівнювання ПЗТ, та домінування у ньому зеленої або червоної складової.

Результати цього другого кроку конкретизації робочої гіпотези презентовані у табл. 2.

Таблиця 1.

Значення та екологічний зміст КП, притаманних ПЗТ *Cyprinus carpio*

Значення КП, отриманих шляхом комп'ютерної обробки RGB – моделі цифрових зображень	Екологічний зміст КП
$G/(R+G+B)$	Рівень первинної продукції спільноти рослинного фону
R/G	Пігментне розмаїття спільноти рослинного фону, її стабільність
$R/(R+G+B)$	Кількість червоних, жовтих та жовто-гарячих фітопігментів у спільноті рослинного фону
$(R+G) / (R+G+B)$	Сумарний показник живої та мертвої фітомаси у спільноті рослинного фону

Далі розглядалися відмінності між вибірками мальків і дорослих у частоті спостережень певних значень презентованих у табл. 2 маркерів розмаїття, вирівнювання та домінування червоної складової.

Таблиця 2

Маркери розмаїття, вирівнювання та домінування зеленої або червоної складової у ПЗТ дикої форми *Cyprinus carpio*

Пари КП, вид кореляцій між якими є маркером розмаїття, вирівнювання ПЗТ, або домінування у ньому зеленої або червоної складової	Пояснення виду кореляцій між парами КП з точки зору їхнього використання як маркерів розмаїття, вирівнювання ПЗТ, або домінування у ньому червоної або зеленої складової
$G/(R+G+B) - R/G$	Негативне, статистично значуще ($p < 0.05$) значення коефіцієнта кореляції – маркер високого розмаїття ПЗТ
$R/(R+G+B) - G/(R+G+B)$	Позитивне, статистично значуще ($p < 0.05$) значення коефіцієнта кореляції – маркер високого вирівнювання ПЗТ
$R/(R+G+B) - (R+G)/(R+G+B)$	Позитивне, статистично значуще ($p < 0.05$) значення коефіцієнта кореляції – маркер високого ступню домінування червоної складової в ПЗТ

Ці відмінності реєструвалися за структурою побудованих з використанням цих маркерів множин кореляційних плеяд. Узагальнені результати такої реєстрації презентовано у табл. 3.

Розглянемо ці узагальнені результати. Почнемо зі значення кореляції між параметрами $R/(R+G+B)$ та $(R+G)/(R+G+B)$, що є показником зсуву ПЗТ у червоний бік. Порівняння цього значення у вибірках дорослих і мальків за результатами даної роботи не виявило системних ефектів, котрі можна б було використати у якості маркерів дії хижаків на ПЗТ дикої форми *Suprinus carpio*.

Такі ефекти, презентовані у табл. 3, наявні при порівнянні значень кореляції між параметрами $G/(R+G+B)$ та R/G . Йдеться мова про порівняння частоти спостережень ПЗТ, значення у яких цього параметра має негативне значення – у вибірках мальків та дорослих. Слід зауважити, що тут і далі йдеться про статистично значущі ($p < 0,05$) значення коефіцієнта кореляції за Пірсоном.

Разом з тим, такі ефекти, презентовані у табл. 3, наявні при порівнянні значень кореляції між параметрами $R/(R+G+B)$ та $G/(R+G+B)$.

Таблиця 3.

Частота спостережень СП, що є маркерами розмаїття та вирівнювання ПЗТ дикої форми *Suprinus carpio* у вибірках мальків та дорослих

Область значень СП, що є маркерами розмаїття та вирівнювання ПЗТ	Частота спостережень значень СП за межами цієї області для вибірки мальків	Частота спостережень значень СП за межами цієї області для вибірки дорослих
Кореляції між параметрами $G/(R+G+B)$ та R/G є негативними і водночас кореляції між параметрами $R/(R+G+B)$ та $G/(R+G+B)$ є позитивними	Нуль випадків із загальної кількості шести спостережень	Чотири випадки із загальної кількості шести спостережень

За допомогою ТМФ можна зазначити у даних табл. 3 наявність статистично значущого ефекту частоти наявності у вибірці дорослих, у порівнянні з вибіркою мальків певної комбінації значень кореляцій. А саме: комбінації з наявністю негативною кореляції між параметрами $G/(R+G+B)$ та R/G і водночас позитивною кореляції між параметрами $R/(R+G+B)$ та $G/(R+G+B)$.

Цей статистично значущий ефект може бути використаний у якості маркера пресингу хижака на жертву у дикій популяції *Suprinus carpio*.

Перспективи даної роботи. Плануємо за використанням аналогічних за колориметричним та біологічним змістом маркерів розробити процедуру обробки цифрових зображень у системах автоматичної та автоматизованої дистанційної реєстрації ознак зміни характеру пресингу хижаків на інші види тварин. Зокрема – носіїв небезпечних інфекційних хвороб та шкідників сільського господарства. З визначенням ризику спалаху чисельності популяцій цих тварин.

Висновки

1. Результати даної роботи базуються на обробці вельми невеликого фактичного матеріалу, щодо випадків різної дії хижаків на різні розмірно-вікові групи одного виду риб. Тож є потреба в розвитку запропонованого у цій роботі методу на більш численному матеріалі.

2. Показана перспективність цього підходу до вивчення впливу хижаків на жертву для розробки високотехнологічних, наукомістких, з використанням дронів методів контролю екологічної стабільності, а також – для розвитку напрямків теоретичної біології у галузі вивчення стратегій адаптаційних механізмів захисного протекуючого забарвлення тварин.

References

1. Беспалов, Yu., Kabalyants & P. Zuev, S. (2021). Relationships of diversity and evenness in adaptation strategies of the effect of protective coloration of animals. *BioRxiv*, 05.06.441914. [//doi.org/10.1101/2021.05.06.441914](https://doi.org/10.1101/2021.05.06.441914)
2. Беспалов, Yu., Nosov, K. & Kabalyants, P. (2017). Discrete dynamical model of mechanisms determining the relations of biodiversity and stability at different levels of organization of living matter. *BioRxiv*. July 2017. doi:[10.1101/161687](https://doi.org/10.1101/161687)
3. Bukvareva, E. N. & Aleshchenko, G. M. (2013). Optimization, niche and neutral mechanisms in the formation of biodiversity. *American Journal of Life Sciences*, 1(4), 174-183. doi: [10.11648/j.ajls.20130104.16](https://doi.org/10.11648/j.ajls.20130104.16)
4. Choi, S.-H., Kim, B.-H., Lee, C.-H. & Lee, Y.-D. (2020). Response of body color change rearing under different light intensity conditions in farmed red spotted grouper, *Epinephelus akaara*. *Fisheries and Aquatic Sciences*. 23, <https://fas.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41240-020-00173-8>
5. Colvin, M. E., Pierce, C. L., Stewart, T. W. & Grummer, S. E. (2012). Strategies to control a common carp population by pulsed commercial harvest. December. *North American Journal of Fisheries Management*, 32(6). doi: [10.1080/02755947.2012.728175](https://doi.org/10.1080/02755947.2012.728175)
6. Coutinho, R. M. & Prado, P. I. (2015). Catastrophic regime shift in water reservoirs and São Paulo water supply crisis. *PLoS One*, 10(9). doi: [10.1371/journal.pone.0138278](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138278)
7. Cummings, C. L., Volk, K. M., Ulanova, A. A., Lam, D. T. U. H. & Ng, P. R. (2021). Emerging Biosecurity Threats and Responses. *Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology*, 13–36. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-2086-9_2
8. Duarte, R. C., Flores A.V. & Stevens, M. (2017). Camouflage through colour change: mechanisms, adaptive value and ecological significance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Biological Sciences*, 372 (1724). doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0342>
9. Endler, J. A. & Mappes, J. (2017). The current and future state of animal coloration research. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 372, 1724. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0352>
10. Green, J. B. A. (2021). Computational biology: Turing's lessons in simplicity. *Biophysical Journal*, 120(19), 4139-4141. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2021.08.041>
11. Haber, A. & Dworkin, I. (2017). Disintegrating the fly: A mutational perspective on phenotypic integration and covariation. *Evolution*, 71, 1, 66-80. <https://doi.org/10.1111/evo.13100>
12. Hulme, P. E., Beggs, J. R., Binny, R. N. & Bray, J. P. (2023). Emerging advances in biosecurity to underpin human, animal, plant, and ecosystem health. *Science*. 26(9), 107462. doi: [10.1016/j.isci.2023.107462](https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107462)
13. Luo, M., Lu, G., Yin, H., Wang, L., Atuganile, M. & Dong, Z. (2021). Fish pigmentation and coloration: *Molecular mechanisms and aquaculture perspectives*. <https://doi.org/10.1111/raq.12583>
14. Lyach, R. (2020). The effect of a large-scale angling restriction in minimum angling size on harvest rates, recapture rates, and average body weight of harvested common carps *Cyprinus carpio*. *Fisheries Research*. 223, 105438. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.105438>.
15. Margalef, R. (1967). Some concepts relative to the organization of plankton. *Oceanography and Marine Biology annual review*, 5, 257-289.
16. Nobre, C. A., Marengo, J. A., Seluchi, M. E., Cuartas, A. L. & Alves, L. M. (2016). Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*. 8(2). doi: [10.4236/jwarp.2016.82022](https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022)
17. Panayotova, I. N. & Horth, L. (2018). Modeling the impact of climate change on a rare color morph in fish. *Ecological Modelling*, 387, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.08.008>

18. Pangestu, M. E. (2023). To meet the climate crisis head-on, our approach to water storage must change. *Worldbank*. <https://blogs.worldbank.org/voices/meet-climate-crisis-head-our-approach-water-storage-must-change>
19. Pauly, D. & Zeller, D. (2016). Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nature Communications*, Article number: 10244. <https://www.nature.com/articles/ncomms10244>
20. Snow, R. A., Porta, M. J. & Patterson, C. P. (2020). Common carp population size and characteristics in Lake Carl Etling, Oklahoma. *Oklahoma Fishery Research Laboratory*. <file:///C:/Users/user/Downloads/8242-Article%20Text-17367-1-10-20210414.pdf>
21. Sugimoto, M. (2002). Morphological color changes in fish: regulation of pigment cell density and morphology. *Microscopy Research and Technique*, 58, 496-503. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/jemt.10168>
22. Sumner, F. B. (1935). evidence for the protective value of changeable coloration in fishes. *The American Naturalist*. Vol. 69, No. 722 (May - Jun., 1935), 245-266.
23. Suprayudi, M. A., Amrillah, M. F. Q. B., Fauzi, I. A. & Yusuf, D. H. (2022). Growth performance of common carp, *Cyprinus carpio* fed with different commercial feed in cirata reservoir cage culture system. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1033 012009. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1033/1/012009/pdf>
24. Svitačová K., Slavík, O. & Horký, P. (2023). Pigmentation potentially influences fish welfare in aquaculture. *Applied Animal Behaviour Science*, 262, 105903. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2023.105903>
25. Turing, A. M. (1952). The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series B, Biological Sciences. 237(641), 37–72. <https://doi.org/10.1098/rstb.1952.0012>
26. Verrill, A. E. (1897). Nocturnal protective coloration of Mammals, Birds, Fishes, Insects, Etc. *The American Naturalist*, 31(362), 99-103. <https://www.jstor.org/stable/2452743>
27. Vissio, P. G., Darias, M. J., Yorio, M. P. D., Sirkin, D. I. P. & Delgado, T. H. H. (2021). Fish skin pigmentation in aquaculture: The influence of rearing conditions and its neuroendocrine regulation. *General and Comparative Endocrinology*, 301, 113662. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2020.113662>
28. Vittadello, S. T., Leyshon, T., Schnoerr, D. & Stumpf, M. P. H. (2021). Turing pattern design principles and their robustness. *Philosophical Transactions A* 379(2213). doi: [10.1098/rsta.2020.0272](https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0272)
29. Yadav, S. (2018). Correlation analysis in biological studies. *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*. 4(2), 116. DOI: [10.4103/jpcs.jpcs_31_18](https://doi.org/10.4103/jpcs.jpcs_31_18)
30. Zavriev, S. K. (2015). Risks and threats in biosecurity area: problem analysis and search for optimal solutions in contemporary conditions. *World economy and international relations*, 9, 57–68. doi: [10.20542/0131-2227-2015-9-57-68](https://doi.org/10.20542/0131-2227-2015-9-57-68)