Original researches

Innovative Principles of Selection of Valuable Genotypes in the System of Competitive Strain Testing

V. V. Chernysky, M. J. Gumentyk

*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets of NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*Received: 21 October 2020
Revised: 30 October 2020
Accepted: 02 November 2020Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets
of NAAS of Ukraine, Klinichna Str., 25, Kyiv,
03141, UkraineTel.: +38-068-327-28-59
E-mail: vadimchernysky_58@ukr.net
hmy@ukr.netCite this article: Chernysky, V. V.,
& Gumentyk, M. J. (2020). Innovative
principles of selection of valuable genotypes
in the system of competitive strain testing.
Agrology, 3(4), 219–224. doi: 10.32819/020026

Abstract. Radical changes in the climate of planet and the transition of Ukrainian economy to digital format require the use of modern technologies in the field of plant selection. In the conditions of fast-changing ecological and economical situations search and realization of express-methods of creation of varieties of different directions of economic use is recognized as expedient. Establishing the possibility of using the latest IT- technologies in the study of biological processes, including the conformities with the established laws and principles of artificial microevolution due to the accelerated development of these specialized software platforms, is relevant. It is determined that the classical method of analysis of variance, due to its linearity, does not allow to distinguish the component of IGE (interaction “genotype-environment”) from the general system of modification variability. Instead, the reflection of the productive system of competitive strain testing in the form of phase-parametric portraits on time series of test years allows establishing the component of IGE as an important element that determines the epigenetic-adaptive properties of the phenotype. The innovativeness of approaches consists in the transition from additive mathematical models to additive-multiplicative models. The main result of research is the formation of new approaches that will select the breeding numbers with a synergistically optimized combination of adaptive-productive properties identified in the process of ontogenetic development and deep phenotyping of plants. On the platform of the received experimental data new conceptual approaches to change of a paradigm of selection are developed. In particular, the classical methodology, selection scheme and staging of the classical genetic experiment in the system of diallel crosses in order to obtain differentiated variances assume that the actual selection takes place on the basis of splitting generations, that is on a phylogenetic and population basis. In the system of phase-parametric portraits of selection samples in the competitive strain testing of different years in various combinations of interactions “genotype-environment” patterns of trajectories of maximum parameters of productivity of number Hybrid 2 in all years of testing ($\lim 574\text{--}842$; $x_{\text{average}} = 713 \text{ g/m}^2$) are allocated. In the system of phase portraits of component features, the peculiarities of the interaction of component features according to the type of pattern formation (trajectory thickenings) are highlighted. In particular, the portraits show three types of interactions, including anisotropic robust ejections (for efficient selection by discreteness), bifurcation states (for selection by direction of practical use) and patterns of trajectory concentrations (for selection of stabilized clusters). An innovative method of analysis of the experimental digital matrix of competitive strain testing as an evolutionary dynamic system on the trajectories of development of phase-parametric portraits is proposed. The possibility of differentiation of selection samples on the interpopulation level at identification of valuable genotypes by phenotype in the innovative system of analysis of phase-parametric portraits which will allow purposefully and effectively to use adequate types of selection is proved.

Keywords: competitive strain testing; phase-parametric portrait; productivity; adaptability; component features.

Інноваційні принципи добору цінних генотипів у системі конкурсного сортовипробування

В. В. Чернуський, М. Я. Гументик

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, м. Київ, Україна

Анотація. Кардинальні зміни клімату планети і перехід економіки України у цифровий формат вимагають застосування сучасних технологій і в галузі селекції рослин. В умовах швидкозмінних еколого-економічних ситуацій пошук та реалізація експрес-методів створення сортів різних напрямів господарського використання визнано доцільними. Встановлення можливостей застосування новітніх ІТ-технологій у вивченні біологічних процесів, у тому числі й закономірностей та принципів штучної мікроеволюції завдяки прискореному розвитку даних спеціалізованих програмних платформ, є актуальним. Визначено, що класичний метод дисперсійного аналізу, в силу своєї лінійності, не дозволяє виділити складову ВГС (взаємодія “генотип–середовище”) із загальної системи модифікаційної мінливості. Натомість відображення продуктивної системи конкурсного сортовипробування у вигляді фазово-параметричних портретів на часових рядах років випробування дозволяє встановити долю

ВГС як важливого елемента, який визначає епігенетично-адаптивні властивості фенотипу. Інноваційність підходів полягає в переході від адитивних математичних моделей до адитивно-мультиплікативних. Основний результат досліджень – формування нових підходів, які дозволяють виділити селекційні номери зі синергетичним оптимізованим поєднанням адаптивно-продуктивних властивостей, виявлених у процесі онтогенетичного розвитку і глибокого фенотипування рослин. На платформі отриманих експериментальних даних розроблені нові концептуальні підходи до зміни парадигми добору. Зокрема, класична методологія, схема добору та постановка класичного генетичного експерименту в системі діалельних схрещувань з метою отримання диференційованих дисперсій передбачають, що власне добір відбувається на базі поколінь, що розщеплюються, тобто на філогенетичній та популяційній основі. У системі фазово-параметричних портретів селекційних зразків у конкурсному сортовипробуванні різних років у різноманітних комбінаціях взаємодій “генотип–середовище” виділені патерни траєкторій максимальних параметрів продуктивності номера Гібрид 2 в усі роки випробування ($\lim$ 574–842; $\bar{x}$ середнє. = 713 г/м²). У системі фазових портретів компонентних ознак виділені особливості взаємодії компонентних ознак за типом формування патернів (згущень траєкторій). Зокрема, на портретах встановлено три типи взаємодій, у тому числі анізотропні робастні викиди (для ефективного добору за дискретністю), біфуркаційні стани (для добору за напрямом господарського використання) та патерни згущень траєкторій (для добору стабілізованих кластерів). Запропоновано інноваційну методику аналізу експериментальної цифрової матриці конкурсного сортовипробування як еволюційну динамічну систему на траєкторіях розвитку фазово-параметричних портретів. Доведено можливість диференціації селекційних зразків на міжпопуляційному рівні при ідентифікації цінних генотипів за фенотипом в інноваційній системі аналізу фазово-параметричних портретів, яка дозволить цілеспрямовано і ефективно використовувати адекватні типи добору.

Ключові слова: конкурсне сортовипробування; фазово-параметричний портрет; продуктивність; адаптивність; компонентні ознаки.

Вступ

Основним завданням селекції є ідентифікація цінних генотипів у системі фенотипових проявів компонентних і інтегральних кількісних ознак урожайності. Методологічна складність ідентифікації цінних трансгресій кількісних ознак пов'язана з їх полімерною природою генотипового визначення та впливом зовнішніх факторів на ступінь експресії генів. У фенотиповому виразі компонентні ознаки врожайності і врожайність, як інтегрований показник, у системі варіаційного ряду підпорядковуються закону нормального розподілу. Відповідно, якби в даному ряду ранжувалися тільки генотипові відмінності між селекційними зразками, то варіаційний ряд мав би дискретний характер. Під впливом модифікуючої дії екзогенних факторів інтервали фенотипової мінливості значно розширюються, відбувається перекриття меж параметричних проявів ознак і ряд набуває вигляду безперервності. Ідентифікувати цінні в генотиповому плані селекційні зразки в даній системі математико-статистичного аналізу надзвичайно складно. Разом з тим розроблені системи математичних перетворень, в яких варіаційному ряду, що еволюціонує, вдається повернути статус дискретності (Yankov, 2018; Liao et al., 2014). Тобто добір цінних генотипів за даною системою аналізу буде значно ефективнішим. Тому мета наших досліджень полягала в пошуку принципів підвищення прецизійності і роздільної здатності методів оцінки параметрів селекційних зразків у конкурсному сортовипробуванні шляхом заміни статичної дисперсійної системи динамічною інтегрованою фазово-параметричною системою, у тому числі дискретність в яких встановлюється за стаціонарними або нестаціонарними станами та біфуркаціями (Ge & Wang, 2013).

Встановлення властивостей фазового портрета для дисипативної динамічної системи є класичною проблемою теорії динамічних систем (Xiong et al., 2017; Ahmadi et al., 2016). Для нелінійних диференціальних систем рівнянь вона настільки складна, що є вирішеною тільки для одновимірних випадку, в якому як атрактори можуть бути присутніми тільки стаціонари. У цьому випадку єдиним методом дослідження властивостей фазового портрета є чисельний експеримент, який полягає в проведенні серії комп'ютерних розв'язків задачі Коші для цільової системи в просторі варіюваних параметрів моделі і просторі початкових даних. І тоді виникає запитання, чи не єдиним способом підвищення ефективності аналізу фазових портретів є облік специфічних особливостей будови того чи іншого типу динамічних систем (Likhoshvai et al., 2015; Khlebodarova et al., 2017).

Для вивчення нелінійних систем та наочної демонстрації процесів, які вони описують, використовується фазовий простір, де створюються фазові портрети. У кожній динаміч-

ної системи є свій портрет. На фазовому портреті присутні особливі точки – точки знаходження рівноваги. За допомогою визначення цих точок можливо передбачити поведінку динамічної системи (Brodsky et al., 2016; Mayevsky et al., 2017).

Методи аналізу параметричної еволюції генотипів і фенотипів потребують використання узгоджених аналітичних платформ. Результати реконструкції предкової форми в параметричних просторах (таких, як рівні експресії генів або частоти прояву алелів) можуть ввійти в суперечність з результатами реконструкції в просторах форм (таких, як фенотипічні морфопростори). Щільне покриття простору форм і використання повністю багатовимірних і, можливо, нелінійних методів можуть допомогти запобігти потенційним проблемам (Polly, 2017).

На зміну екологічних умов рослини реагують завдяки генетично обумовленим механізмам узгодження і взаємозв'язку динаміки формування морфологічних структур у рамках цілісності індивідуального розвитку. Фенотиповий прояв цих механізмів приховано від безпосереднього спостереження і реєстрації. Виявлення їх структури і провідних факторів, які обумовлюють високий рівень адаптивності соняшнику до екологічних умов, є можливим при використанні методів багатомірного аналізу (Kolomatskaya, 2012).

Матеріал та методи

Дослідне поле розміщене в зоні центрального Полісся України на типових дерново-підзолистих ґрунтах супіщаного складу. Вміст гумусу сягає 0,95–1,15%. Облікова площа ділянки становить 10 м², кількість повторень шестикратна. Агротехніка – загальноприйнята для зони Полісся. Спектр селекційних номерів включав популяції – синтетики, створені в рамках системи полікросних рекомбінацій. Погодні умови вегетаційних періодів охоплювали у тому числі й екстремальні впливи на ріст і розвиток рослин, зокрема вегетаційний період 2012 року був найбільш посушливим і спекотним. Найбільш оптимальними зареєстровані умови росту рослин протягом 2013 та 2014 років.

Як класичний і еталонний в аналізі експериментальних даних використано метод дисперсійного аналізу відповідно до “Методики проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин на придатність до поширення в Україні” та метод дисперсійного аналізу (Leshchuk et al., 2017).

Як інноваційний і експериментальний застосовано метод нелінійного аналізу фазово-параметричних портретів багатфакторних систем (Elhadj et al., 2009; Volos et al., 2016; Qi et al., 2005), у тому числі адаптовано до нашого випадку – факторів генотипових відмінностей між номерами та умов року вегетації.

Залежно від характеру коренів характеристичного рівняння можливі шість типів стану рівноваги (Riznichenko, 2002). Згідно з таким підходом, вид фазових траєкторій представлений на площині x, y , а в нашому тривимірному вигляді $z \times y$ для цих шести випадків зображений на рис. 1. П'ять типів стану рівноваги грубі, їх характер не змінюється при досить малих змінах правих частин рівнянь. При цьому малими повинні бути зміни не тільки правих частин, а й їх похідних першого порядку. Шостий стан рівноваги – центр, негрубий. За малих змін параметрів у правій частині рівнянь він переходить в стійкий або нестійкий фокус (Riznichenko, 2002).

Головне, що в даній системі можливо аналізувати ступінь тензорної напруженості при взаємодії факторів, зокрема, параметри еко-градієнтних зрушень в системі ВГС (взаємодія “генотип–середовище”) та анізотропно-векторну (нерівнозначну, асиметричну) спрямованість взаємодій. Усі системи взаємодій компонентних ознак при формуванні комплексної, відображені

на реальних криволінійних статистичних поверхнях, ми можемо проаналізувати за допомогою абстрактних аналітичних поверхонь (лінійних, квадратичних, степеневих) і привести їх до загальноконцептуального виду.

Беручи до уваги методологію аналізу морфогенезу рослин і процесів біологічного часу, створено фазовий портрет (рис. 2), де верхня частина області G_R відповідає надземній частині рослин, а нижня – кореню. У верхній, надземній частині області G_R видно траєкторії за типом сідла. Їх декілька, кінцеве число. Ці траєкторії можна ототожити з функцією конуса наростання – спочатку закладаються листя, а потім репродуктивні органи. Відзначимо й те, що траєкторії за типом сідла мають сепаратиси, які йдуть зі сідла в сідло. Це означає, що на цих траєкторіях порушуються умови грубості системи біологічного часу і система стає негрубою: відбувається інтенсивний поділ меристематичної тканини, закладаються нові органи (Naumov, 2008).

Рис. 1. Системи фазових портретів та умови стійкості динамічних систем за Г. Ю. Різниченком; а) – наша модифікація в тривимірній системі

Рис. 2. Фазовий портрет динамічної системи біологічного часового поля для випадку: А – рівень напруженості факторів зовнішнього середовища; $Usr = 0.9$ (за М. М. Наумовим); $dt = \Delta t = 1/5000$ – крок поділки шкали (15 хв), весь період часу від 0 до 5000 відповідає періоду часу $0.01 \leq T \leq 1$ або $T_n \leq T \leq T_{цв}$ (53-я доба); $O = \theta$ – кут повороту вектора часу

Таким чином, у системі ВГС (взаємодії “генотип–середовище”) можна відстежувати ступінь адекватності і оптимальності реакцій генотипів на стресові впливи зовнішнього середовища, тобто безпосередньо візуально встановлювати адаптаційні характеристики селекційних зразків.

У процесі аналізу експериментальних даних використане програмне забезпечення Scilab 5.5.2, Statistic 6.0 та Derive 5.0.

Результати

За результатами конкурсного сорто випробування в середньому протягом 2011–2015 рр. показники стандартів Харківське 98 та Клич (743 і 645 та 726 і 626 г/м²) за насінневою продуктивністю в окремі роки на 10,3–11,6% достовірно перевищували номери Фінал, Марко, Феніка, Гібрид 2, а в середньому за п’ять років на 10,5% – сорт Гібрид 2 (новостворений сорт жита озимого Композитне) – табл. 1.

Причиною розбіжностей між параметрами НР_{річних} і НР_{міжрічної}, на нашу думку, є вплив мультиплікативної системи взаємодії “генотип–середовище”. Саме він визначає високу відмінність найменших істотних різниць між селекційними номерами в межах одного року, коли задіяний один фактор генотипових відмінностей і найменшої істотної різниці між роками, коли задіяні два фактори відмінностей на рівні генотипів і умов року. Дана двофакторна система аналізується в підсистемі адитивних і мультиплікативних взаємодій (табл. 1, 2). Частка мультиплікативної системи може бути значною, тому й НР_{міжрічна} вельми відрізняється від НР_{річних} у бік збільшення.

На жаль, дана система дозволяє тільки виявити розщеплені частки адитивних і мультиплікативних дисперсій в умовах однофакторного дослідження конкурсного сорто випробування, але не надається можливості пояснити причини виникнення і деталізовані механізми проявів системи ВГС. Параметри насінневої продуктивності перспективних номерів жита озимого в конкурсному сорто випробуванні отримані протягом п’ятирічного періоду – табл. 1.

Натомість розвиток системи біоінформатики, теорії регуляторних контурів генних мереж, протеоміки тощо все більше наближає нас до думки про необхідність виділення епігеномних взаємодій у системі “генотип–середовище” як окремої групи в

рамках паратипової (стовпової) мінливості (табл. 2).

Створення динамічного фазово-параметричного портрета конкурсного сорто випробування, виявлення кластерів генотипових і епігенотипових взаємодій, як оптимізовано взаємозв’язаних ознак балансу продуктивності і адаптивності, дозволить більш адекватно ідентифікувати цінні селекційні зразки.

Та ж сама матриця конкурсного сорто випробування може бути представлена у вигляді нелінійного фазово-параметричного портрета з можливістю виявлення адаптивних реакцій сортів (рис. 3). Наприклад, у даній системі фазово-параметричних портретів селекційних зразків, у конкурсному сорто випробуванні різних років у різних комбінаціях взаємодій “генотип–середовище”, виділені патерни траєкторій максимальних параметрів продуктивності номера Гібрид 2 в усі роки випробування. Як метод № 1 використано спосіб обчислення ВГС (взаємодія генотип–середовище) у системі рівнянь Лоренца, яка описує конвекційно-дифузійні явища в природі і, зокрема, є універсальним засобом аналізу для біологічних систем. Програма дозволяє обчислити постійні коефіцієнти взаємодій факторів характерні для даної системи (a, b, c). Таким чином, aZ = загальна продуктивність фенотипу; bX = частка генотипу в загальній параметричній врожайності; cY = частка взаємодії генотипу і середовища (рис. 3).

Більш детальний аналіз нелінійних просторів ознак “продуктивність–адаптивність–гомеостатичність” в системі диференціальних рівнянь в програмі Statistic 6.0 (вставка) дозволив також ідентифікувати номер Гібрид 2 (№ 7) як найбільш оптимізований стосовно трьох наведених вище факторів (рис. 4).

З метою розкриття внутрішнього механізму рушійної еволюційної сили і принципів топологічної організації фазово-параметричних портретів систем конкурсного сорто випробування нами у 2016–2018 рр. побудовані портрети компонентних ознак продуктивності селекційних номерів на прикладі параметричних показників структури врожаю 2015 року (рис. 5).

За характером візуальних якісних топологічних станів фазово-параметричних портретів, порівняно з еталоном адитивно-мультиплікативних взаємодій в системі дисперсійного розподілу в сферичних координатах за канонічною формулою $z = 1 - e^{-\lambda x}$, де λ – управляючий параметр порядку, можна виявити особливості формування систем компонентних ознак в

Таблиця 1. Характеристика перспективних номерів жита озимого в конкурсному сорто випробуванні за насінневою продуктивністю

Номер, ознака	Насіннева продуктивність, г/м ²					середнє
	2011р.	2012 р.	2013 р.	2014 р.	2015 р.	
Фінал	664	611	791	776	605	689
Марко	582	576	798	791	560	661
Феніка	576	583	784	772	552	653
Юлія	539	511	688	669	547	591
Альт	521	481	724	693	539	592
Гібрид 1	607	509	720	736	614	637
Гібрид 2	678	574	842	822	649	713
Вафа	586	504	714	699	576	616
Мофа	590	564	718	708	574	631
Харківське 98	614	531	737	743	600	645
Клич, ст.	612	526	726	714	551	626
НР ₀₅ , г/м ²	15,0	19,0	21,0	20,3	16,2	36,5

Таблиця 2. Джерела варіації та вагова доля дисперсій за генотипами (строки) та взаємодією “генотип–середовище” плюс фактори зовнішнього середовища (стовпці)

Джерело варіації	SS	df	MS	Fфакт.	P-	Fтабл.
Строки	70282.55	10	7028.255	11.62568	5.08E-09	2.077248
Стовпці	403305	4	100826.2	166.7803	2.24E-24	2.605975
Похибка	24181.82	40	604.5455	-	-	-
Разом	497769.3	54	-	-	-	-

Рис. 3. Фазово-параметричний портрет селекційних зразків за продуктивністю в конкурсному сортовипробуванні різних років у різних комбінаціях взаємодій “генотип–середовище” за 2011–2015 рр. (вставка – модель фрактала “атрактора Лоренца” і його якісна оцінка)

їх онтогенетичній взаємодії. Зокрема, на портретах виявлені анізотропні робастні викиди (для ефективного добору за дискретністю), біфуркаційні стани (для добору за напрямом господарського використання), або патерни згущень траєкторій (для добору стабілізованих кластерів). Найбільш значимі системи взаємодій з робастними викидами ДК, КЗК, МЗК. Система МТЗ характеризується найбільшою стабільністю.

Обговорення

Класично генотип організму описувався як спадковий генетичний матеріал, який кодує всі процеси в житті організму. Навпаки, фенотип відноситься до поняття, що подібні генотипи можуть відрізнятися за своєю експресією в різних умовах навколишнього середовища і розвитку (Bustos-Korts et al., 2016; Lado et al., 2016). “Друга революція в молекулярній біології”, яка привнесла в молекулярну біологію нові концепції з фізики і хімії, такі як потужна ідея ландшафту вільної енергії, дозволяє по-новому поглянути на догму генотипу-фенотипу. Біомоле-

кули слід розглядати не як статичні окремі форми, а як статистичні ансамблі – структурні ансамблі, які дозволяють білкам виконувати свої функції, і через мережу пов’язують генотипи з фенотипами. Таким чином, в широкому клітинному контексті саме мережа контролює транскрипцію за допомогою регуляції генів (Nussinov et al., 2019).

Найпоширеніший спосіб зрозуміти модель росту сільськогосподарських культур – це виявити набір пов’язаних тематичних рівнянь, які разом проорокують цільовий фенотип (зазвичай урожай зерна) і ряд пов’язаних проміжних фенотипів (компоненти врожаю, такі як біомаса і кількість зерна). Цільова ознака – це нелінійна функція проміжних ознак і чинників навколишнього середовища (ковеперемінних). Проміжні фенотипи є результатом функцій, визначених генотип-залежними параметрами ВГС, і додатковими факторами навколишнього середовища в часі (Malosetti M, et al. (2013); Sun J, et al. (2017)). Параметри ВГС можна виміряти експериментально в польових експериментах або на платформах фенотипування, а також їх можна передбачити на основі інформації про молекулярні маркери (Technow F, et al. (2015); Velazco JG, et al., (2017)).

Відповідно до наших уявлень, фенотип подає себе як об’єднану на кібернетичних принципах біологічну систему зі складною внутрішньою емерджентною структурою, яка з’являється тільки в процесі його (фенотипу) онтогенетичного розвитку. Розвиток відбувається на часових рядах різної темпоральної швидкості, зокрема, на довгих трендовитих часових рядах виявляється прояв філогенетичних олігогенів, які формують жорсткі базові архетипи і біотипи. Відбуваються марковські процеси, на яких сучасний стан системи залежить виключно від її попереднього положення і не залежить від вихідних умов. Дані системи жорстко детерміновані (короткостеблості у злаків, вусатість форм у гороху, детермінованість гілкування у люпину). На швидких часових рядах спостерігається кібернетична взаємодія “генотип-середовище” під дією епігенетичних ефекторів (альтернативний сплайсинг, метилування ДНК), прояв якої відбувається в синергетичних системах і загальна оптимізація онтогенетичного формування фенотипу значною мірою залежить від взаємодії тензорного тиску вихідних умов і наявності комплексу регуляторних генів, які характеризуються трендо-

Рис. 4. Система фазово-параметричних портретів селекційних зразків у конкурсному сортовипробуванні різних років у різних комбінаціях взаємодій “генотип–середовище”, 2011–2015

Рис. 5. Топологічні стани фазово-параметричних портретів компонентних ознак за результатами структурного аналізу селекційних номерів конкурсному сортовипробування, 2016–2018 рр.

стійкою пам'яттю ситуацій, які відбувалися раніше. Нами виявлені оптимізовані регуляторні комплекси і верифіковані способи їх аналізу порівняно з класичними, які найбільш адекватно описують механізм дії системи ВГС. Зокрема це відбувається завдяки застосуванню аналізу експериментальних даних у нелінійному, як мінімум трьохвимірному фазово – параметричному просторі.

Висновки

Запропонована інноваційна методика аналізу експериментальної цифрової матриці конкурсного сортовипробування як еволюційна динамічна система. На траєкторіях розвитку фазово-параметричних портретів, у системі якісного аналізу доведена можливість виявлення оптимізованих патернових стаціонарних станів відповідності внутрішньогеномних управлінських функцій і екзофакторних умов зовнішнього середовища, що забезпечує ідентифікацію генотипів (за принципом дискретності басейнів тяжіння) з оптимізованим поєднанням продуктивних і адаптивних властивостей. Зокрема, у системі фазово-параметричних портретів селекційних зразків у конкурсному сортовипробуванні різних років у різних комбінаціях взаємодій “генотип–середовище” виділені патерни траєкторій максимальних параметрів продуктивності номера Гібрид 2 в усі роки випробування ($\lim 574\text{--}842$; $x_{cp} = 713 \text{ г/м}^2$).

За характером візуальних якісних топологічних станів фазово-параметричних портретів компонентних ознак виявлені особливості формування систем у їх онтогенетичній взаємодії. Зокрема, на портретах встановлено три типи взаємодій: анізотропні робастні викиди (для ефективного добору за дискретністю); біфуркаційні стани (для добору за напрямом господарського використання); патерни згущень траєкторій (для добору стабілізованих кластерів).

Відомо, що однією з фундаментальних проблем складних систем є проблема кількісного визначення ступеня синергії між різними структурними елементами, у тому числі динамічних біологічних систем. Наразі розроблені різні математичні моделі методів ідентифікації таких структур, однак проблема довгострокового прогнозу їх динамічного розвитку залишається невирішеною. Тому в наших подальших дослідженнях планується використання ляпуновських фрактальних атракторів, які забезпечать можливість прогнозування динаміки поведінки фазово-параметричного простору параметрів ознак селекційних зразків з можливістю передбачення успадковування епігенетичних змін фенотипу, сформованих в системі ВГС.

References

- Ahmad, I., Saaban, A. B., Ibrahim, A. B., & Shahzad, M. (2016). A research on active control to synchronize a new 3D chaotic system. *Systems*, 4(2).
- Brodsky, Y. B., & Mayevskii, O. (2016). Modeling natural processes of interaction with uncertainty in the initial conditions of the Cauchy. *Science Rise Problem*, 9/2(26), 24–30.
- Brodsky, Y. B., Mayevskiy, O. V., & Vasko, S. M. (2017). Analysis of phase trajectories in modeling the dynamics of the development of the predator-prey ecosystem *Bulletin of ZhNAEU*, 1(58), 1, 185–194.
- Bustos-Korts, D., Malosetti, M., Chapman, S., & van Eeuwijk, F. A. (2016). Modelling of genotype by environment interaction and prediction of complex traits across multiple environments as a synthesis of crop growth modelling, genetics and statistics. In: X. Yin, P. C. Struik (Eds.), *Crop systems biology – narrowing the gaps between crop modelling and genetics* (pp. 55–82). Springer.
- Elhadj, Z., & Sprott, J. (2009). Some explicit formulas of Lyapunov exponents for three-dimensional quadratic mappings. *Front. Phys. China*, 4, 549–555.
- Ge, G., & Wang, W. (2013). The application of the undetermined fundamental frequency method on the period-doubling bifurcation of the 3D nonlinear system. In *Abstract and Applied Analysis*. NY, USA, Hindawi.
- Khlebodarova, T. M., Kogai, V. V., Fadeev, S. I., & Likhoshvai, V. A. (2017). Chaos and hyperchaos in simple gene network with negative feedback and time delays. *J. Bioinform. Comput. Biol.*, 15(2), 1650042. doi: [10.1142/S0219720016500426](https://doi.org/10.1142/S0219720016500426)
- Kolomatskaya, V. P. (2012). Factorial structure of ecological plasticity of sunflower hybrids in the conditions of the Forest-Steppe of Ukraine. *Breeding and seed production*, 101, 75–83.
- Lado, B., Barrios, P. G., Quincke, M., Silva, P., & Gutiérrez, L. (2016). Modeling genotype $\times$ environment interaction for genomic selection with unbalanced data from a wheat breeding program. *Crop Sci.* doi: [10.2135/cropsci2015.04.0207](https://doi.org/10.2135/cropsci2015.04.0207)
- Leshchuk, N. V., Mazhuga, K. M., & Orlenko, N. S. (2017). Comparative analysis of statistical software products for the qualification examination of plant varieties for suitability for distribution. *Sorting and protection of plant variety rights*, 13(4).
- Liao, D., & Tlsty, T. D. (2014). Evolutionary game theory for physical and biological scientists. II. Population dynamics equations can be associated with interpretations. *Interface Focus* 4, 20140038 doi: [10.15547/artte.2018.03.007](https://doi.org/10.15547/artte.2018.03.007)
- Likhoshvai, V. A., Kogai, V. V., Fadeev, S. I., & Khlebodarova, T. M. (2015). Alternative splicing can lead to chaos. *J. Bioinform. Comput. Biol.*, 13, 1540003.
- Likhosway, V. A., Kogan, V. V., Fadeev, S. I., & Khlebodarova, T. M. (2017). On the relation of properties of one-dimensional mappings of control functions with chaos in a special-type equation with a delayed argument. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 12(2). doi: [10.17537/2017.12.385](https://doi.org/10.17537/2017.12.385)
- Malosetti, M., Ribaut, J.-M., & van Eeuwijk, F. A. (2013). The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. *Front. Physiol.*, 4, 1–17. doi: [10.3389/fphys.2013.00044](https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00044)
- Mayevsky, A. V. (2016). Solution of the problem of identification of working parameters of a mathematical model of the process of dynamics of ecological systems. *Electronic modeling*, 2(38), 105–115.
- Naumov, M. M. (2008). Plant morphogenesis and processes of biological time *Bulletin of the Odessa State Ecological University*, 5, 122–130.
- Nussinov, R., Tsai, C.-J., & Jang, H. (2019). Protein ensembles link genotype to phenotype. *PLoS Comput Biol.*, 15(6), e1006648. doi: [10.1371/journal.pcbi.1006648](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006648)
- Polly, P. D. (2017). Morphometrics and evolution: the challenge of crossing rugged phenotypic landscapes with straight paths. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 21(4), 452–461. doi: [10.18699/VJ17.264](https://doi.org/10.18699/VJ17.264)
- Qi, G., Chen, G., Du, S., Chen, Z., & Yuan, Z. (2005). Analysis of a new chaotic system. *Phys. A Stat. Mech. Appl.*, 352, 295–308.
- Riznichenko, G. (2002). Lectures on mathematical models in biology. Part 1. SIC “Regular and chaotic dynamics”, Izhevsk.
- Sun, J., Rutkoski, J. E., Poland, J. A., Crossa, J., Jannink, J.-L., & Sorrells, M. E. (2017). Multitrait, random regression, or simple repeatability model in high-throughput phenotyping data improve genomic prediction for wheat grain yield. *Plant Genome*. doi: [10.3835/plantgenome2016.11.0111](https://doi.org/10.3835/plantgenome2016.11.0111)
- Technow, F., Messina, C. D., Totir, L. R., & Cooper, M. (2015). Integrating crop growth models with whole genome prediction through approximate Bayesian computation. *PLoS One*, 10(6), 1–20.
- Velazco, J. G., Rodríguez-Álvarez, M. X., Boer, M. P., Jordan, D. R., Eilers, P. H. C., Malosetti, M., & van Eeuwijk, F. A. (2017). Modelling spatial trends in sorghum breeding field trials using a two-dimensional P-spline mixed model. *Theor Appl Genet*, 130(7), 1375–1392.
- Volos, C., Maaita, J. O., Vaidyanathan, S., Pham, V. T., Stouboulos, I., & Kyprianidis, I. (2016). A novel 4-D hyperchaotic four-wing system with a saddle-focus equilibrium. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, 64, 339–343.
- Xiong, L., Liu, Z., & Zhang, X. (2017). Analysis, circuit implementation and applications of a novel chaotic system. *Circuit World*, 43, 118–130.
- Yankov, K. (2018). Phase Portrait of Second-Order Dynamic Systems / *Applied Researches in Technics, Technologies and Education*, 6(3), 252–263. doi: [10.15547/artte.2018.03.007](https://doi.org/10.15547/artte.2018.03.007)