NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-10]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

13.00.00-PEDAGOGIKA
journal.namdu.uz
PEDAGOGICAL

BIOLOGIYA, KIMYO, FIZIKA VA INFORMATIKA FANLARI INTEGRATSIYASI ASOSIDA TALABALARDA BIOINSPIRATSION FIKRLASH KOMPETENSIYALARINI RIVOJLANTIRISH

G‘aniyeva Guliruxsor Islamovna
Termiz davlat universiteti
Botanika kafedrasi katta o‘qituvchisi, p.f.f.d., (PhD)
guliruxsor@tersu.uz

Annotatsiya: *Maqolada biologiya, kimyo, fizika va informatika integratsiyasi asosida talabalarda bioinspiratsion fikrlashni rivojlantirish masalasi yoritilgan. Tadqiqotning maqsadi biologik kuzatuvni texnik g‘oya va loyiha yechimiga aylantirish kompetensiyasini shakllantirishdan iborat. Tajribada 23 nafar, nazorat guruhida 22 nafar talaba qatnashgan. Tajriba guruhidagi 7 nafar talabada yangi loyiha g‘oyalari shakllangan. Ulardan 6 nafari tuman, 2 nafari esa respublika bosqichida ishtirok etgan. Nazorat guruhida loyiha faolligi kuzatilmagan. Natijalar fanlararo bioinspiratsion yondashuv talabalarning kreativ va yaratuvchan faoliyatini rag‘batlantirishini ko‘rsatgan. Ilmiy yangilik biologik obyekt xususiyatini fanlararo tahlil orqali texnik g‘oya, model va prototipga aylantirishga yo‘naltirilgan metodik yondashuvning taklif etilganidadir.*

Kalit so‘zlar: *bioinspiratsion fikrlash, fanlararo integratsiya, biologiya, kreativlik, yaratuvchanlik, modellashtirish, prototip, talaba.*

РАЗВИТИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ БИОИНСПИРИРОВАННОГО МЫШЛЕНИЯ У СТУДЕНТОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ БИОЛОГИИ, ХИМИИ, ФИЗИКИ И ИНФОРМАТИКИ

Аннотация: *В статье рассматривается развитие био-инспирационного мышления студентов на основе интеграции биологии, химии, физики и информатики. Цель исследования заключается в формировании способности преобразовывать биологические наблюдения в технические идеи и проектные решения. В экспериментальной группе участвовали 23 студента, в контрольной — 22 студента. У 7 студентов экспериментальной группы сформировались новые проектные идеи. Из них 6 студентов успешно участвовали в районном этапе, а 2 — в республиканском этапе конкурса. В контрольной группе проектная активность не наблюдалась. Полученные результаты показывают, что междисциплинарный био-инспирационный подход способствует развитию творческой и креативной деятельности студентов. Научная новизна исследования заключается в предложении методического алгоритма преобразования особенностей биологических объектов через междисциплинарный анализ в техническую идею, модель и прототип.*

Ключевые слова: *био-инспирационное мышление, междисциплинарная интеграция, биология, креативность, творчество, моделирование, прототип, студент.*

DEVELOPING BIOINSPIRATION-BASED THINKING COMPETENCIES IN STUDENTS THROUGH THE INTEGRATION OF BIOLOGY, CHEMISTRY, PHYSICS, AND COMPUTER SCIENCE

Abstract: *The article examines the development of students’ bio-inspired thinking through the integration of biology, chemistry, physics, and informatics. The study aims to develop students’ ability to transform biological observations into technical ideas and project solutions. The experimental group included 23 students, while the control group consisted of 22 students. Seven students in the experimental group developed new project ideas. Of these, six successfully participated at the district level and two advanced to the national stage of the competition. No project activity was observed in the control group. The findings indicate that an interdisciplinary bio-inspired approach can promote students’ creativity and productive idea generation. The scientific novelty of the study lies in proposing a methodological algorithm that transforms biological characteristics, through interdisciplinary analysis, into technical ideas, models, and prototypes.*

Keywords: *bio-inspired thinking, interdisciplinary integration, biology, creativity, innovation, modelling, prototype, students.*

Kirish. XXI asr ta’limi nafaqat tayyor bilimlarni o‘zlashtirishga, balki o‘quvchi va talabani muammoli vaziyatlarni tahlil qiluvchi, yangi g‘oya ishlab chiquvchi va fanlararo bilimlarni amaliy vazifalarga qo‘llay oluvchi subyekt sifatida shakllantirishga yo‘naltirilmoqda. Bu jarayonda biologiya alohida o‘rin tutadi, chunki tabiatdagi tirik tizimlar murakkab, uyg‘un, energiya jihatidan tejamkor va funksional jihatdan mukammal yechimlar manbai hisoblanadi. Shu ma’noda

biologiya faqat organizmlar haqidagi fan emas, balki texnik tafakkur va innovatsion g‘oyalarni ilhomlantiruvchi fan sifatida ham muhimdir [1].

So‘nggi yillarda bionika va bioinspiratsion dizayn yondashuvlari texnika, muhandislik va STEM ta’limida keng qo‘llanilmoqda [2]. Biroq oliy ta’limda, ayniqsa bo‘lajak mutaxassislar va talabalar bilan ishlashda biologik kuzatuvni kimyo, fizika va informatika bilan integratsiyalab, yangi qurilma sxemasi, model yaratishga olib boruvchi metodik tizim yetarlicha ishlab chiqilmagan. Ko‘pincha fanlar alohida o‘qitiladi, natijada talaba bilimlarni bilsa-da, ularni yagona kreativ mahsulotga aylantirishda qiyinchilikka duch keladi.

Tadqiqotimizning asosiy maqsadi biologiya, kimyo, fizika va informatika fanlari integratsiyasi asosida talabalarda bioinspiratsion fikrlash, yaratuvchanlik, kreativlik va kognitiv kompetensiyalarni rivojlantirishning nazariy-metodik asoslarini ishlab chiqishdir. Tadqiqot vazifalari sifatida bioinspiratsion ta’limga oid zamonaviy manbalarni tahlil qilish, biologik kuzatuvdan texnik g‘oyaga o‘tish metodikasini ishlab chiqish, bioinspiratsion topshiriqlar tizimini taklif qilish va tegishli model hamda qurilma g‘oyalarini tavsiflash belgilandi.

Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili. Fanlararo integratsiya, ayniqsa STEM va STEAM yondashuvlari, ta’limda muammoli va loyihaviy faoliyatni qo‘llab-quvvatlashi ko‘plab tadqiqotlarda qayd etilgan [3,4]. Bunday yondashuvlarda biologik bilimlar ko‘pincha kuzatish va tushuntirish bilan cheklanmay, texnologik dizayn bilan bog‘lanadi. Yata, Ohtani va Isobe STEM ta’limida fanlarning o‘ziga xos mazmuni saqlangan holda ular muhandislikka yo‘naltirilgan vazifalarda birlashtirilishi zarurligini ta’kidlaydi. Bu g‘oya biologiya ta’limiga tatbiq etilganda, tirik organizmlar bioinspiratsion ilhom manbai bo‘lib xizmat qiladi.

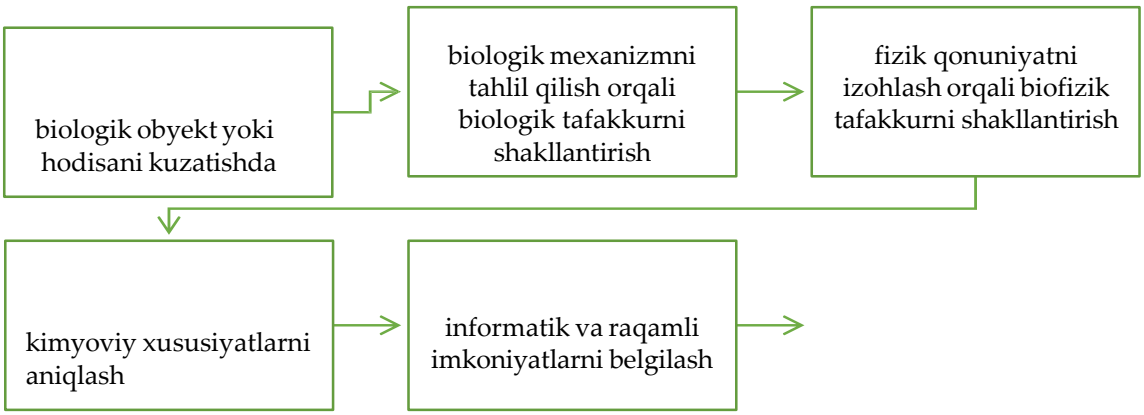
Bioinspiratsion dizayn bo‘yicha tadqiqotlar talabalar tabiatdagi funksiyalarni kuzatib, ulardan texnik yechim chiqarishga o‘rgatilganda kreativlik va muammoli fikrlash rivojlanishini ko‘rsatadi [6]. Shu bilan birga, bu jarayon o‘z-o‘zidan sodir bo‘lmaydi. Talaba biologik xususiyatni faqat ko‘rishi emas, balki uni fizik qonun, kimyoviy xossa va raqamli model bilan bog‘lay olishi kerak. Masalan, suvda harakatlanish hodisasini tushunish uchun gidrodinamika, qarshilik kuchi va material xususiyatlari; filtratsiya tizimlarini tushunish uchun sirt xossalari, zarracha hajmi va oqim dinamikasi zarur bo‘ladi [7].

Modelga asoslangan ta’lim fikrlash bioinspiratsion faoliyatning metodik tayanchidir [8,9]. Talaba biologik obyektni oddiy rasm sifatida emas, balki tuzilma–funksiya–muhit munosabati asosida ko‘rishi, undan model yaratishi va keyin texnik analog taklif qilishi lozim. Hisoblash modellashtirish va raqamli vositalar esa ushbu bosqichlarni vizualizatsiya qilish, sensorli boshqaruv, algoritmik fikrlash va jarayonni boshqarish imkonini beradi [10, 13].

Shu bilan birga, mavjud adabiyotlar ko‘proq alohida jihatlarni — bionika, kreativlik, STEM integratsiyasi yoki modellashtirishni o‘rganadi. Ularni biologiya markazida, kimyo, fizika va informatika bilan birlashtirib, talabaning bioinspiratsion qurilma yaratish kompetensiyasi sifatida tushuntiruvchi yaxlit metodik tizim nisbatan kam yoritilgan. Mazkur maqola ana shu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqotimiz konseptual-metodik yo‘nalishda olib borildi. Tadqiqot dizayni sifatida strukturaviy adabiyotlar tahlili, qiyosiy tahlil, konseptual sintez va pedagogik modellashtirish usullaridan foydalanildi. Tahlil uchun fanlararo integratsiya, bioinspiratsion dizayn, kreativ kompetensiya, modelga asoslangan ta’lim, tizimli fikrlash va hisoblash modellashtirishga oid 2020–2026-yillarda chop etilgan ishonchli ilmiy manbalar tanlab olindi [1]–[12]. Tadqiqot obyekti sifatida talabalar bilan tashkil etiladigan bioinspiratsion o‘quv faoliyati, predmeti sifatida esa biologik kuzatuvdan texnik qurilma g‘oyasiga o‘tishni ta’minlaydigan fanlararo metodik mexanizm olindi. Tadqiqotning asosiy g‘oyasi shundan iboratki, biologiya, kimyo, fizika va informatika fanlari mazmunli integratsiya qilinsa, talaba tirik organizmlarning adaptiv xususiyatlaridan ilhomlanib, yangi texnik model, sxema yoki qurilma taklif qilish darajasiga ko‘tariladi.

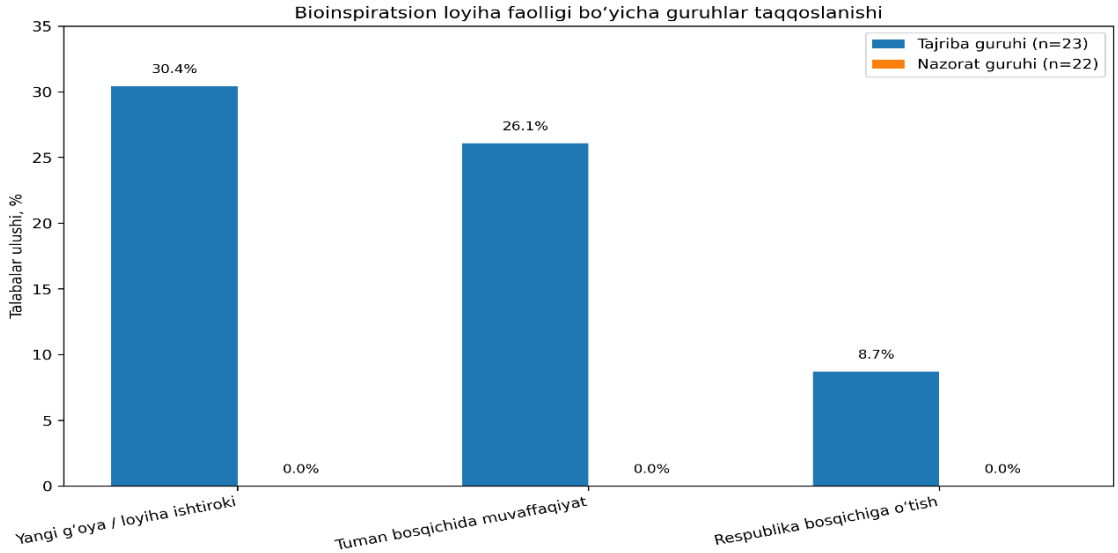
Metodologik jihatdan bioinspiratsion ta’lim jarayoni quyidagi bosqichlar asosida qurildi(1-sxema)



Natija: bioinspiratsion g‘oya ishlab

Tahlil va natijalar. Pedagogik tajribada jami 45 nafar talaba ishtirok etdi. Shundan 23 nafari tajriba guruhini, 22 nafari nazorat guruhini tashkil etdi. Tajriba guruhidagi mashg‘ulotlar biologiya, kimyo, fizika va informatika bilimlarini integratsiyalash, tirik organizmlarning tuzilishi va funksiyalarini texnik muammoni hal etish manbai sifatida tahlil qilish hamda bioinspiratsion loyiha g‘oyalarini ishlab chiqishga yo‘naltirildi. Nazorat guruhida esa odatdagi fan doirasidagi o‘quv faoliyati davom ettirildi.

Tajriba yakunida kuzatilgan eng muhim amaliy natija talabalarning fanlararo bilimlarni real loyiha g‘oyasiga aylantira boshlaganida namoyon bo‘ldi. Tajriba guruhidagi 23 nafar talabadan 7 nafarida bioinspiratsion yo‘nalishdagi yangi loyiha g‘oyalari shakllandi va ular ushbu g‘oyalari bilan «Ulug‘bek vorislari» ko‘rik-tanlovida ishtirok etdi. Bu tajriba guruhi talabalarining 30,4 % ini tashkil etdi. Nazorat guruhidagi 22 nafar talabadan esa hech biri loyiha yoki tanlov bilan bog‘liq faoliyatda qatnashmadi(1-rasm).



1-rasm. Tajriba va nazorat guruhlarida bioinspiratsion loyiha faolligi natijalari

Tajriba guruhida loyiha g‘oyasi shakllangan 7 nafar talabadan 6 nafari «Ulug‘bek vorislari» tanlovining tuman bosqichida muvaffaqiyatli natijaga erishgan. Bu tajriba guruhining umumiy soniga nisbatan 26,1 %, loyiha g‘oyasi shakllangan talabalar soniga nisbatan esa 85,7 % ni tashkil etadi. Demak, yangi g‘oya ishlab chiqqan talabalar orasida loyiha mazmunini tanlov talablari darajasiga olib chiqish ko‘rsatkichi yuqori bo‘lgan. Ushbu 6 nafar talabadan 2 nafari respublika bosqichiga o‘tib, unda faol ishtirok etdi. Respublika bosqichiga yetib borgan talabalar tajriba guruhining 8,7 % ini, dastlab loyiha g‘oyasi shakllangan 7 nafar talabaning esa 28,6 % ini tashkil etdi. Tuman bosqichida muvaffaqiyatli qatnashgan 6 nafar talaba ichida respublika bosqichiga o‘tish darajasi 33,3 % bo‘ldi.

1- jadval.

Tajriba va nazorat guruhlari natijalarining statistik taqqoslanishi

Ko‘rsatkich	Tajriba guruhi, n=23	Tajriba guruhi, %	Nazorat guruhi, n=22	Nazorat guruhi, %	Guruhlar farqi, foiz
Yangi g‘oya shakllanishi va loyiha/tanlovda ishtirok	7	30,4	0	0	+30,4
Tuman bosqichida muvaffaqiyatli natija	6	26,1	0	0	+26,1
Respublika bosqichiga o‘tish	2	8,7	0	0	+8,7

Tajriba guruhida loyiha g‘oyasi shakllangan 7 nafar talabadan 6 nafari «Ulug‘bek vorislari» tanlovining tuman bosqichida muvaffaqiyatli natijaga erishgan. Bu tajriba guruhining umumiy soniga nisbatan 26,1 %, loyiha g‘oyasi shakllangan talabalar soniga nisbatan esa 85,7 % ni tashkil etadi. Demak, yangi g‘oya ishlab chiqqan talabalar orasida loyiha mazmunini tanlov talablari darajasiga olib chiqish ko‘rsatkichi yuqori bo‘lgan.

Ushbu 6 nafar talabadan 2 nafari respublika bosqichiga o‘tib, unda faol ishtirok etdi. Respublika bosqichiga yetib borgan talabalar tajriba guruhining 8,7 % ini, dastlab loyiha g‘oyasi shakllangan 7 nafar talabaning esa 28,6 % ini tashkil etdi. Tuman bosqichida muvaffaqiyatli qatnashgan 6 nafar talaba ichida respublika bosqichiga o‘tish darajasi 33,3 % bo‘ldi(2-jadval).

2-jadval.

Tajriba guruhida bioinspiratsion g‘oyaning loyihaviy natijaga aylanish dinamikasi

Bosqich	Talabalar soni	Tajriba guruhiga nisbatan, %	Oldingi bosqichga nisbatan, %
Tajriba guruhida jami talabalar	23	100,0	–
Yangi g‘oya shakllangan va tanlovda qatnashgan	7	30,4	30,4
Tuman bosqichida muvaffaqiyatli qatnashgan	6	26,1	85,7
Respublika bosqichiga o‘tgan	2	8,7	33,3

Natijalar bioinspiratsion yondashuvning faqat nazariy bilimni o‘zlashtirish bilan cheklanmaganini ko‘rsatadi. Tajriba guruhidagi ayrim talabalar biologik obyekt yoki mexanizmni kuzatish, uning fizik va kimyoviy asoslarini tushuntirish, informatik vositalar yordamida sxemalashtirish hamda mazkur bilimlarni yangi loyiha g‘oyasiga transformatsiya qilish bosqichiga o‘tgan. Shu jihatdan «Ulug‘bek vorislari» tanlovidagi real ishtirok pedagogik natijaning tashqi, amaliy indikatori sifatida qaralishi mumkin.

Guruhlar o‘rtasidagi farq kichik tanlanma va nazorat guruhidagi nol chastotalarni hisobga olgan holda Fisherning aniq mezoni yordamida qo‘shimcha tekshirildi(3-jadval).

3-jadval.

Tajriba va nazorat guruhlari natijalarining statistik taqqoslanishi

Natija ko‘rsatkichi	Tajriba guruhi	Nazorat guruhi	Fisher aniq mezoni, *p*
Yangi g‘oya/loyiha faolligi	7/23	0/22	0,009
Tuman bosqichidagi muvaffaqiyat	6/23	0/22	0,022
Respublika bosqichiga o‘tish	2/23	0/22	0,489

Izoh: *p* qiymatlari ikki tomonlama Fisher aniq mezoni asosida hisoblandi.

Yangi g‘oya shakllanishi va tanlovdagi ishtirok ko‘rsatkichi bo‘yicha tajriba hamda nazorat guruhlari o‘rtasidagi farq statistik jihatdan sezilarli bo‘ldi (p=0,009). Shuningdek, tuman bosqichida muvaffaqiyatli natijaga erishish bo‘yicha ham guruhlar orasidagi farq kuzatildi (p=0,022). Bu natijalar tajriba guruhida tashkil etilgan fanlararo va bioinspiratsion faoliyat bilan talabalarni mustaqil loyiha yaratishga jalb etish o‘rtasida ijobiy bog‘liqlik mavjudligini ko‘rsatadi. Respublika bosqichiga o‘tish ko‘rsatkichi tajriba guruhida 2 nafar talaba bilan cheklangani sababli guruhlar orasidagi farq statistik jihatdan ishonchli darajaga yetmadi (p=0,489). Mazkur holat metodikaning samarasizligini anglatmaydi; aksincha, bunday yuqori bosqichdagi natija kam uchraydigan hodisa bo‘lib, uni ishonchli statistik baholash uchun kattaroq tanlanma va bir necha tajriba sikli talab etiladi. Shu bois respublika bosqichiga chiqish natijasini hozirgi tadqiqotda metodikaning qo‘shimcha amaliy natijasi sifatida talqin qilish maqsadga muvofiq. Tajriba natijalarida yana bir muhim jihat kuzatildi. 23 nafar talabaning 7 nafari yangi g‘oya ishlab chiqishga o‘tgan bo‘lsa-da, 16 nafar talaba, ya’ni 69,6 % da bunday tashqi loyihaviy natija qayd etilmadi. Bu bioinspiratsion fikrlashni shakllantirish barcha talabalar uchun bir xil tezlikda kechmasligini ko‘rsatadi. Ayrim talabalar biologik obyektning tuzilishini yaxshi tushunsa ham, ushbu bilimni texnik analogga ko‘chirish, fanlararo bog‘lanishni qurish yoki mustaqil loyiha shakliga keltirishda qo‘shimcha metodik yordamga muhtoj bo‘lishi mumkin. Tuman bosqichida muvaffaqiyatli bo‘lgan 6 talabadan faqat 2 nafari respublika bosqichiga o‘tgani ham loyiha g‘oyasini ishlab chiqish bilan uni yuqori darajadagi innovatsion mahsulotga aylantirish o‘rtasida qo‘shimcha kompetensiyalar talab etilishini ko‘rsatadi. Bunda qurilmaning texnik asoslanganligi, prototiplash, raqamli model yaratish, loyiha iqtisodiyoti, taqdimot mahorati va muammoning amaliy ahamiyatini dalillash kabi omillar rol o‘ynashi mumkin. Mazkur omillar ushbu tajribada alohida o‘lchanmaganligi sababli ularning ta’siri haqidagi xulosalar keyingi tadqiqotlarda tekshirilib boriladi. Nazorat guruhida birorta talabaning loyiha faoliyatida qatnashmagani esa alohida e’tiborga loyiq. Bu ma’lumot odatiy ta’lim shaklida biologiya, fizika, kimyo va informatika fanlarida o‘zlashtirilgan bilimlarning o‘z-o‘zidan innovatsion loyiha faoliyatiga ko‘chmasligi mumkinligini ko‘rsatadi. Talabaga biologik muammoni ko‘rish, tabiatdagi mexanizmni abstraksiyalash, uni boshqa fan qonuniyatlari bilan bog‘lash va texnik yechimga aylantirish uchun maxsus pedagogik topshiriq hamda metodik qo‘llanma talab qilinadi.

Shu asosda tajriba-sinovda quyidagi muammolar aniqlandi:

– tajriba guruhidagi barcha talabalarda bioinspiratsion g‘oyani mustaqil loyiha darajasiga olib chiqish ko‘nikmasi bir xil shakllanmagan;

– biologik bilimni texnik analogga transfer qilish eng murakkab bosqichlardan biri sifatida namoyon bo‘lgan;

– yangi g‘oya paydo bo‘lishi bilan yuqori darajadagi tayyor loyiha yaratish o‘rtasida prototiplash, raqamli modellashtirish va muhandislik asoslash kompetensiyalariga ehtiyoj mavjud;

– nazorat guruhida loyiha faolligining kuzatilmagani fanlararo bilim transferini maxsus metodik tashkil etish zarurligini ko‘rsatadi;

– tanlanmaning kichikligi va loyiha natijalarining kam sonli bo‘lishi yuqori bosqichdagi natijalarni statistik umumlashtirish imkoniyatini cheklaydi;

XULOSA VA TAKLIFLAR. Biologiya, kimyo, fizika va informatika fanlarini bioinspiratsion topshiriqlar asosida integratsiyalash talabalarning biologik kuzatuvni amaliy g‘oya, model va texnik loyiha yechimiga aylantirish faoliyatini rag‘batlantirdi. Tajriba guruhidagi 23 nafar talabadan 7 nafari yangi loyiha g‘oyasi bilan «Ulug‘bek vorislari» tanlovida qatnashdi, 6 nafari tuman bosqichida muvaffaqiyatli natijaga erishdi va 2 nafari respublika bosqichiga o‘tdi; nazorat guruhida esa loyiha faolligi kuzatilmadi.

Olingan natijalar bioinspiratsion yondashuv talabalarda fanlararo tafakkur, kreativlik va yaratuvchanlikni amaliy faoliyat bilan bog‘lash uchun istiqbolli metodik yo‘nalish ekanini ko‘rsatadi. Shu bilan birga, tajriba guruhidagi barcha talabalarda loyiha g‘oyasi shakllanmagani metodik qo‘llab-quvvatlash, raqamli modellashtirish va prototiplash ko‘nikmalarini yanada kuchaytirish zarurligini ko‘rsatadi.

Takliflar. Oliy ta’lim amaliy mashg‘ulotlariga «biologik obyekt → funksiya → mexanizm → fanlararo tahlil → texnik analog → model/prototip» algoritmiga asoslangan bioinspiratsion topshiriqlarni muntazam joriy etish.

Talabalarning g‘oyalarini loyiha darajasiga olib chiqish uchun biologiya, fizika, kimyo va informatika yo‘nalishlari ishtirokidagi mentorlik, raqamli modellashtirish va prototiplash mashg‘ulotlarini tashkil etish.

Keyingi tadqiqotlarda metodikaning samaradorligini kattaroq tanlanma, pretest–posttest baholash hamda kreativlik va fanlararo kompetensiyani o‘lchovchi maxsus mezonlar asosida tekshirish.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Momsen, J., Speth, E. B., Wyse, S., & Long, T. (2022). Using Systems and Systems Thinking to Unify Biology Education. *CBE—Life Sciences Education, 21*(2), es3. https://doi.org/10.1187/cbe.21-05-0118

2. Goel, A. K., McAdams, D. A., & Stone, R. B. (2014). *Biologically Inspired Design: Computational Methods and Tools*. London: Springer.

3. Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education, 3*(11). https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z

4. Thibaut, L., Ceuppens, S., De Loof, H., De Meester, J., Goovaerts, L., Struyf, A., Depaepe, F. (2018). Integrated STEM education: A systematic review of instructional practices. *European Journal of STEM Education, 3*(1), https://doi.org/10.20897/ejsteme/85525

5. Wilson, J. O., Rosen, D., Nelson, B. A., & Yen, J. (2010). The effects of biological examples in idea generation. *Design Studies, 31*(2), 169–186. https://doi.org/10.1016/j.destud.2009.10.003

6. Bar-Cohen, Y. (Ed.). (2011). *Biomimetics: Nature-Based Innovation*. Boca Raton: CRC Press.

7. Udosen, A. N., & Magana, A. J. (2026). Model-based reasoning in STEM education: A systematic literature review. *International Journal of STEM Education, 13*, https://doi.org/10.1186/s40594-026-00621-2

8. Trujillo, C. M., Momsen, J. L., Wyse, S. A., Speth, E. B., & Long, T. M. (2026). Scholarly discourse of systems thinking within and beyond STEM education. *International Journal of STEM Education, 13*, 12. https://doi.org/10.1186/s40594-026-00603-4

9. Magana, A. J., Arigye, J., Udosen, A., Lyon, J. A., Joshi, P., & Pienaar, E. (2024). Scaffolded team-based computational modeling and simulation projects for promoting representational competence and regulatory skills. *International Journal of STEM Education, 11*, 34. https://doi.org/10.1186/s40594-024-00494-3

10. Eidin, E., Bowers, J., Damelin, D., & Krajcik, J. (2023). The effect of using different computational system modeling approaches on applying systems thinking. *Frontiers in Education, 8*, 1173792. https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1173792

11. Miller KM and Yoon SA (2023) Teaching complexity in biology through agent-based simulations: the relationship between students’ knowledge of complex systems and metamodeling knowledge. Front. Educ. 8:1198307. doi: 10.3389/feduc.2023.1198307