BIOLOGIK SISTEMALARNI O‘RGANISHDA TERMODINAMIKA USULLARINING AHAMIYATI

Buzrukov To‘lqin Omonivich-Termiz Iqtisodiyot va servis universiteti p.f.f.d PhD, dotsent.Email:tolqinbuzrukov5@gmail.com

Muratova Fotima Maratovna-Termiz Iqtisodiyot va servis universiteti talabasi.Email: muratovafotima9@gmail.com

Annotatsiya

Ushbu maqola biologik sistemalarni o‘rganishda termodinamika usullarining markaziy ahamiyatini ko‘rib chiqadi. Unda tirik organizmlardagi energiya almashinuvi, moddalar almashinuvi va o‘z-o‘zini tashkil etish jarayonlarini tushunishda termodinamikaning asosiy tamoyillari qanday qo‘llanilishi tahlil qilinadi. Xususan, entropiya, Gibbs erkin energiyasi va nomutanosib termodinamika tushunchalari hujayra darajasidan ekosistemalargacha bo‘lgan biologik hodisalarni izohlashda muhim rol o‘ynaydi. Termodinamik yondashuvlar biologik sistemalarning barqarorligi, samaradorligi va evolyutsion strategiyalarini chuqurroq anglashga imkon beradi. Shu sababli, bu usullar biologiya va biofizika sohalarida fundamental tadqiqotlar uchun ajralmas vosita hisoblanadi.

Kalit so‘zlar: Termodinamika, Biologik sistemalar, Energiya almashinuvi, Entropiya, Metabolizm, O‘z-o‘zini tashkil etish, Nomutanosib termodinamika

Abstract

This article explores the central importance of thermodynamic methods in the study of biological systems. It analyzes how fundamental principles of thermodynamics are applied to understand energy transformation, metabolism, and self-organization processes in living organisms. Specifically, concepts such as entropy, Gibbs free energy, and non-equilibrium thermodynamics play a crucial

role in explaining biological phenomena from the cellular level to ecosystems. Thermodynamic approaches enable a deeper understanding of the stability, efficiency, and evolutionary strategies of biological systems. Therefore, these methods are indispensable tools for fundamental research in the fields of biology and biophysics.

Keywords: Thermodynamics, Biological systems, Energy transfer, Entropy, Metabolism, Self-organization, Non-equilibrium thermodynamics

Аннотация

Данная статья рассматривает центральное значение термодинамических методов в изучении биологических систем. В ней анализируется, как фундаментальные принципы термодинамики применяются для понимания процессов преобразования энергии, метаболизма и самоорганизации в живых организмах. В частности, такие понятия, как энтропия, свободная энергия Гиббса и неравновесная термодинамика, играют ключевую роль в объяснении биологических явлений от клеточного уровня до экосистем. Термодинамические подходы позволяют глубже понять стабильность, эффективность и эволюционные стратегии биологических систем. Следовательно, эти методы являются незаменимым инструментом для фундаментальных исследований в областях биологии и биофизики.

Ключевые слова: Термодинамика, Биологические системы, Энергетический обмен, Энтропия, Метаболизм, Самоорганизация, Неравновесная термодинамика

Kirish

Biologik sistemalar murakkabligi, ularning dinamik tabiati va o‘z-o‘zini tashkil etish qobiliyati ularni tushunish uchun ko‘p tarmoqli yondashuvni talab qiladi. An’anaviy biologiya ko‘pincha molekulyar va hujayraviy darajadagi

jarayonlarga e’tibor qaratgan bo‘lsa-da, hayotning fundamental mexanizmlarini chuqurroq anglash uchun fizikaviy tamoyillar, xususan, termodinamika usullari tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. Termodinamika, yunoncha "issiqlik" va "kuch" so‘zlaridan kelib chiqqan bo‘lib, makroskopik sistemalarning umumiy xususiyatlarini, termodinamik muvozanat holatlarini va ular orasidagi o‘tish jarayonlarini o‘rganuvchi fan hisoblanadi [2]. Uning asosiy qonunlari – energiyaning saqlanishi (Birinchi qonun), issiqlikning ishga to‘liq aylanishi mumkin emasligi va issiqlikning sovuqroq sistemadan issiqroq sistemaga o‘z-o‘zidan o‘tmasligi (Ikkinchi qonun), shuningdek, mutlaq nol haroratda entropiyaning nolga yaqinlashishi (Uchinchi qonun) – biologik jarayonlarning energetik asoslarini tahlil qilish uchun mustahkam nazariy poydevor yaratadi [2]. Bu qonunlar tirik organizmlarning ochiq sistemalar sifatida atrof-muhit bilan doimiy energiya va modda almashinuvi sharoitida faoliyatini tushunishda markaziy rol o‘ynaydi.

Biologik sistemalar doimiy ravishda energiya almashinuvi va modda transformatsiyalari bilan bog‘liq bo‘lib, ular termodinamik nuqtai nazardan tushuntirilishi mumkin. Metabolizm, oqsil buklanishi, membrana transporti va gen ekspressiyasi kabi hayotiy jarayonlar energiyaning boshqarilishi, entropiyaning o‘zgarishi va muvozanatdan uzoqlashish holatlari bilan chambarchas bog‘liq. Bu jarayonlarni tahlil qilishda termodinamik yondashuvlar, masalan, Gibbs erkin energiyasi, entropiya va entalpiya kabi tushunchalar yordamida sistemalarning barqarorligi, reaksiyalarning yo‘nalishi va samaradorligi haqida muhim ma’lumotlar olish mumkin. Tiriklikning o‘z-o‘zini tashkil etish va tartibni saqlash qobiliyati, ayniqsa, no-muvozanat termodinamikasi doirasida chuqur tahlil qilinib, biologik hodisalarning fizikaviy asoslarini ochib beradi. M.alimova va Sh.mavjudova tomonidan yozilgan "Termodinamika Asoslari" kabi asarlar ushbu fundamental prinsiplarni biologik kontekstda qo‘llash uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi [1]. Ushbu maqola biologik sistemalarni o‘rganishda termodinamika

usullarining ahamiyatini, ularning hayotiy jarayonlarni tahlil qilishdagi o‘rnini va kelajakdagi tadqiqotlar uchun istiqbollarini atroflicha ko‘rib chiqishni maqsad qilgan.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili

So‘nggi yillarda biologik sistemalarni termodinamik nuqtai nazardan o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlar sezilarli darajada kengaydi va chuqurlashdi. Kirish qismida termodinamikaning asosiy qonunlari va uning biologik jarayonlardagi o‘rni umumiy tarzda yoritilgan bo‘lsa-da, mavzuga oid adabiyotlar tahlili bu sohadagi zamonaviy yondashuvlar, nazariy rivojlanishlar va amaliy tatbiqlarni chuqurroq ko‘rib chiqishni talab qiladi. An’anaviy ravishda, termodinamika muvozanat holatlarini tahlil qilishga qaratilgan bo‘lsa-da, tirik sistemalarning ochiq va muvozanatdan uzoq bo‘lgan tabiati no-muvozanat termodinamikasi (non-equilibrium thermodynamics) tamoyillarini qo‘llashni talab etadi. Bu yo‘nalishdagi dastlabki ishlar I. Prigogine tomonidan boshlab berilgan bo‘lsa-da, uning zamonaviy biologiyadagi tatbiqlari so‘nggi o‘n yillikda yangi bosqichga ko‘tarildi. Masalan, A. Karimova va Sh. Raximovaning 2022-yilda chop etilgan tadqiqoti [3] hujayra ichidagi signal uzatish yo‘llarining termodinamik samaradorligini tahlil qilib, bu jarayonlarning entropiya ishlab chiqarish va energiya sarfi o‘rtasidagi murakkab bog‘liqlikni ochib berdi. Ular, ayniqsa, hujayraviy qaror qabul qilish mexanizmlarida termodinamik cheklovlar va optimallash tamoyillarining rolini ta’kidladilar, bu esa hujayra faoliyatining energetik asoslarini chuqurroq anglashga yordam beradi.

Hisoblash termodinamikasi (computational thermodynamics) so‘nggi yillarda biologik sistemalarni o‘rganishda ajralmas vositaga aylandi. Molekulyar dinamika (Molecular Dynamics, MD) simulyatsiyalari, Monte-Karlo usullari va kvant kimyoviy hisob-kitoblar yordamida biologik makromolekulalarning dinamik xususiyatlari, konformatsion o‘zgarishlari va reaksiyalarining erkin energiya profillari bashorat qilinmoqda. S. Jo‘rayev va M. Xolmatovaning 2021-yildagi

tadqiqoti [11] fermentativ reaksiyalarning o‘tish holatlarini va ularning aktivlanish energiyasini MD simulyatsiyalari yordamida tahlil qilib, fermentlarning katalitik mexanizmlarini termodinamik nuqtai nazardan tushuntirdi. Sun’iy intellekt (AI) va mashinani o‘rganish (Machine Learning, ML) usullari ham termodinamik parametrlarni bashorat qilish va murakkab biologik sistemalardagi energiya oqimlarini tahlil qilishda tobora ko‘proq qo‘llanilmoqda [12, 2022-yil, U. Saidova va F. Olimov]. Bu yondashuvlar, eksperimental ma’lumotlarni to‘ldirib, biologik jarayonlarning atom darajasidagi mexanizmlarini chuqurroq anglashga yordam beradi, shu bilan birga yangi biologik materiallar va dori vositalarini loyihalashda samaradorlikni oshiradi.

Tadqiqot metodologiyasi

Biologik sistemalarni termodinamik nuqtai nazardan o‘rganish murakkab va ko‘p tarmoqli yondashuvni talab etadi, bunda turli eksperimental va hisoblash usullari, shuningdek, nazariy modellar uyg‘unlikda qo‘llaniladi. Ushbu tadqiqot metodologiyasi biologik jarayonlarning energetik asoslarini, ularning harakatlantiruvchi kuchlarini va cheklovlarini chuqur anglashga qaratilgan. So‘nggi yillarda ushbu sohada erishilgan yutuqlar, ayniqsa, yuqori aniqlikdagi o‘lchov asboblari va kuchli hisoblash resurslarining rivojlanishi bilan chambarchas bog‘liq bo‘lib, bu biologik termodinamikani zamonaviy biologiya tadqiqotlarining ajralmas qismiga aylantirdi. Metodologik yondashuvlar atom darajasidan tortib, hujayraviy va hatto ekologik sistemalargacha bo‘lgan turli miqyoslarda termodinamik prinsiplarni qo‘llashga imkon beradi, bu esa tiriklikning barcha darajalaridagi energiya transformatsiyalari va modda almashinuvini tushunish uchun keng qamrovli vositalar to‘plamini taqdim etadi.

Kalorimetrik usullardan tashqari, spektroskopik texnikalar ham biologik sistemalardagi termodinamik o‘zgarishlarni bilvosita o‘lchashga imkon beradi. Yadro magnit rezonansi (NMR) spektroskopiyasi oqsillarning uch o‘lchamli strukturasini, dinamikasini va ligandlar bilan o‘zaro ta’sirlarini atom darajasida

o‘rganishda qo‘llaniladi. NMR yordamida oqsillarning konformatsion o‘zgarishlari, ularning erkin energiya landshaftidagi turli holatlar orasidagi o‘tishlar va bog‘lanish kinetikasi haqida ma’lumotlar olish mumkin [16, 2023-yil, A. Saidov va Sh. Mirzayev]. NMR, ayniqsa, dinamik jarayonlarni va ko‘p holatli muvozanatlarni tahlil qilishda kuchli vosita bo‘lib, bog‘lanish konstantalari va kinetik tezliklarni termodinamik jihatdan aniqlashga yordam beradi. Dumaloq dixroizm (CD) spektroskopiyasi oqsillarning ikkilamchi strukturasidagi o‘zgarishlarni kuzatish orqali ularning termal denaturatsiyasini va buklanish jarayonlarini tahlil qilishda samarali vosita hisoblanadi. Fluoresans spektroskopiyasi esa oqsillarning konformatsion o‘zgarishlari, ligand bog‘lanishi va agregatsiya jarayonlarini yuqori sezuvchanlik bilan kuzatish imkonini beradi, bu esa termodinamik parametrlarni bilvosita aniqlash uchun asos bo‘ladi. Bu usullar, ayniqsa, past konsentratsiyalarda ishlash qobiliyati va tezkor o‘lchovlar o‘tkazish imkoniyati bilan ajralib turadi.

So‘nggi yillarda yagona molekula darajasidagi tadqiqot usullari (single-molecule techniques) biologik termodinamikaga yangi istiqbollarni ochdi. Optik pinsetlar, atom kuchi mikroskopiyasi (AFM) va bir molekulali FRET kabi usullar yordamida individual molekulalarning kuch, masofa va energiya o‘zgarishlari bevosita o‘lchanadi. Bu usullar, masalan, oqsil buklanishining yakka molekula darajasidagi kinetikasini, DNKning cho‘zilishi va yechilishi jarayonlarining mexanotermodinamikasini, shuningdek, molekulyar motorlarning ish samaradorligini tahlil qilishda qo‘llaniladi [17, 2020-yil, G. Olimova va B. Xolmatov]. Yagona molekula darajasidagi o‘lchovlar, ansambl o‘lchovlarida yashirin qoladigan heterogenlikni va o‘tish holatlarining nozik mexanizmlarini ochib berishga imkon beradi, bu esa biologik jarayonlarning termodinamik landshaftini yanada aniqroq tasvirlashga yordam beradi. Bu usullar, ayniqsa, no-muvozanat termodinamikasi tamoyillarini tirik sistemalarga tatbiq etishda, masalan, kichik sistemalardagi energiya dissipatsiyasini va entropiya ishlab

chiqarishni bevosita o‘lchashda muhim rol o‘ynaydi. Ularning asosiy afzalligi individual molekulalarning xatti-harakatini kuzatish imkoniyati bo‘lsa-da, texnik murakkablik va past o‘tkazuvchanlik ularning cheklovlaridir.

Hisoblash termodinamikasi va biomolekulyar simulyatsiyalar eksperimental ma’lumotlarni to‘ldiruvchi va nazariy tushunchalarni chuqurlashtiruvchi ajralmas vosita hisoblanadi. Molekulyar dinamika (MD) simulyatsiyalari atom darajasida biologik makromolekulalarning harakatini va o‘zaro ta’sirlarini vaqt o‘tishi bilan kuzatish imkonini beradi. Bu simulyatsiyalar yordamida oqsillarning konformatsion o‘zgarishlari, ligandlarning bog‘lanish yo‘llari, membrana dinamikasi va suv molekulalarining roli kabi murakkab jarayonlar o‘rganiladi. MD simulyatsiyalari, shuningdek, erkin energiya hisob-kitoblari (masalan, Umbrella Sampling, Metadynamics, FEP/LIE) uchun asos bo‘lib xizmat qiladi, bu esa bog‘lanish erkin energiyasi, reaksiyaning aktivlanish energiyasi va konformatsion o‘tishlarning erkin energiya profillarini bashorat qilishga imkon beradi [18, 2022-yil, N. Ismoilov va S. G‘ofurov]. Bu yondashuvlar, dori vositalarini kashf qilishda, fermentlarning katalitik mexanizmlarini tushunishda va oqsil buklanishining murakkab yo‘llarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega. MD ning afzalligi uning atom darajasidagi tafsilotlarni taqdim etishi va dinamik jarayonlarni modellashtirish qobiliyatidir, ammo uning cheklovlari hisoblash quvvatiga bo‘lgan talabchanlik va kuch maydonlarining aniqligiga bog‘liqligidir. Monte-Karlo (MC) usullari esa, asosan, sistemalarning konfiguratsion fazosini samarali o‘rganish va statistik mexanika asosida termodinamik xususiyatlarni hisoblash uchun qo‘llaniladi, ayniqsa, yirik biomolekulyar komplekslarning konformatsion samplingida va fazaviy o‘tishlarni modellashtirishda samarali hisoblanadi.

Kvant kimyoviy (QM) hisob-kitoblar biologik reaksiyalarning atom darajasidagi mexanizmlarini, ayniqsa, fermentativ katalizning o‘tish holatlarini va elektron o‘zgarishlarini yuqori aniqlikda tahlil qilishda qo‘llaniladi. QM/MM gibrid usullari yordamida fermentlarning faol markazidagi kimyoviy reaksiyalar

kvant mexanik darajada, atrof-muhit esa klassik molekulyar mexanik darajada modellashtiriladi, bu esa katta biologik sistemalarda kimyoviy jarayonlarning energetikasini realistik tarzda o‘rganishga imkon beradi [19, 2023-yil, J. Qodirov va M. Xamidov]. Bu usullar, fermentlarning katalitik samaradorligini tushunish va yangi biokatalizatorlarni loyihalashda muhim nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi. QM hisob-kitoblarining aniqligi yuqori bo‘lsa-da, ularning hisoblash narxi juda yuqori bo‘lib, katta sistemalarga qo‘llashni cheklaydi.

Sun’iy intellekt (AI) va mashinani o‘rganish (ML) usullari biologik termodinamik tadqiqotlarda tobora keng qo‘llanilmoqda. Bu usullar, katta eksperimental va simulyatsiya ma’lumotlar to‘plamlarini tahlil qilish, termodinamik parametrlarni bashorat qilish, energiya landshaftlarini xaritalash va murakkab biologik sistemalardagi energiya oqimlarini optimallashtirishda samarali vosita hisoblanadi. Masalan, neyron tarmoqlar yordamida oqsil buklanishining erkin energiya landshaftlari bashorat qilinmoqda, yoki dori-maqsad oqsili bog‘lanishining termodinamik profillari tezkor ravishda aniqlanmoqda [20, 2024-yil, S. Olimov va G. Rustamova]. ML modellari, shuningdek, eksperimental ma’lumotlardan termodinamik parametrlarni ajratib olishda va simulyatsiyalarni tezlashtirishda (masalan, kuch maydonlarini optimallashtirishda, konformatsion samplingni yaxshilashda) qo‘llaniladi, bu esa biologik termodinamik tadqiqotlarning samaradorligini sezilarli darajada oshiradi. AI/ML ning afzalligi uning murakkab, chiziqli bo‘lmagan bog‘liqliklarni o‘rganish va katta ma’lumotlar to‘plamlaridan ma’no chiqarish qobiliyatidir, ammo uning cheklovlari ma’lumotlar sifatiga bog‘liqlik va "qora quti" muammosidir.

Nazariy yondashuvlar ham biologik termodinamik metodologiyaning ajralmas qismidir. Muvozanat termodinamikasi tamoyillari Gibbs erkin energiyasi, entalpiya va entropiya kabi tushunchalar orqali biologik reaksiyalarning yo‘nalishi va muvozanat holatlarini tahlil qilishda asos bo‘lib xizmat qilsa-da, tirik sistemalarning ochiq va muvozanatdan uzoq bo‘lgan tabiati no-muvozanat

termodinamikasi tamoyillarini qo‘llashni talab etadi. Bu yo‘nalish, biologik sistemalarda energiya dissipatsiyasini, entropiya ishlab chiqarishni va o‘z-o‘zini tashkil etish mexanizmlarini tushunishda markaziy rol o‘ynaydi. Prigogine tomonidan ishlab chiqilgan dissipativ strukturalar nazariyasi, tiriklikning tartibni saqlash qobiliyatini atrof-muhitda entropiyaning oshishi hisobiga tushuntiradi. Zamonaviy no-muvozanat termodinamikasi, masalan, fluktuatsiya teoremalari va integral fluktuatsiya teoremalari kabi vositalar yordamida kichik biologik sistemalardagi energiya oqimlarini va entropiya ishlab chiqarishni miqdoriy jihatdan tahlil qilishga imkon beradi [21, 2021-yil, F. Karimov va Z. Mirzayeva]. Bu usullar, molekulyar motorlarning samaradorligini, hujayra ichidagi signal uzatish yo‘llarining energetik narxini va metabolik yo‘llarning optimallashuvini tushunishda muhim ahamiyatga ega. No-muvozanat termodinamikasi, ayniqsa, tiriklikning o‘ziga xos xususiyatlarini, ya’ni doimiy energiya sarfi evaziga tartibni saqlash qobiliyatini tushuntirishda fundamental nazariy asosni taqdim etadi.

Axborot termodinamikasi esa biologik sistemalardagi axborotni qayta ishlash va uzatish jarayonlarini energetik nuqtai nazardan o‘rganadi. Bu soha, axborotni saqlash, uzatish va qayta ishlash uchun zarur bo‘lgan minimal energiya sarfini (Landauer printsipi) va bu jarayonlarning termodinamik cheklovlarini tahlil qiladi. Gen ekspressiyasi, DNK replikatsiyasi, hujayra ichidagi signalizatsiya va neyron tarmoqlardagi axborot almashinuvi kabi jarayonlar axborot termodinamikasi yordamida tahlil qilinadi, bu esa biologik sistemalarning axborotni qayta ishlash samaradorligini va uning evolyutsion ahamiyatini tushunishga yordam beradi [22, 2023-yil, H. Saidov va D. Olimova]. Bu yondashuv, biologik axborotni fizikaviy cheklovlar bilan bog‘lab, hayotning fundamental mexanizmlariga yangicha nazar tashlash imkonini beradi. Axborot termodinamikasining rivojlanishi biologik sistemalarni nafaqat moddiy va energetik, balki axborot nuqtai nazaridan ham tushunishga imkon beradi, bu esa murakkablik va o‘z-o‘zini tashkil etishni tahlil qilishda yangi vositalarni taqdim etadi.

Ushbu metodologik yondashuvlarning integratsiyasi biologik termodinamik tadqiqotlarning asosini tashkil etadi. Eksperimental ma'lumotlar hisoblash simulyatsiyalarini kalibrlash va tasdiqlash uchun ishlatilsa, simulyatsiyalar eksperimental natijalarni atom darajasida tushuntirish va yangi gipotezalarni shakllantirish uchun xizmat qiladi. Nazariy modellar esa bu ma'lumotlarni umumlashtirib, biologik jarayonlarning fundamental prinsiplarini ochib beradi. Masalan, ITC yordamida o'lchangan bog'lanish termodinamikasi MD simulyatsiyalari bilan birgalikda tahlil qilinib, bog'lanishning molekulyar mexanizmlari va energetik landshafti chuqur o'rganiladi. Yoki, yagona molekula darajasidagi eksperimentlar no-muvozanat termodinamikasi nazariyalari bilan birgalikda tahlil qilinib, molekulyar motorlarning ish samaradorligi va energiya dissipatsiyasi mexanizmlari aniqlanadi. Bu sinergik yondashuv, biologik sistemalarning murakkabligini tushunishda va ularni manipulyatsiya qilishda yangi imkoniyatlar yaratadi. Metodologiyalarning bunday uyg'unligi biologik hodisalarni turli miqyoslarda, atom darajasidan tortib, hujayraviy va organizm darajasigacha bo'lgan jarayonlarni tahlil qilishga imkon beradi, bu esa biologik murakkablikni to'liqroq anglash uchun zarurdir.

Xulosa qilib aytganda, biologik sistemalarni termodinamik nuqtai nazardan o'rganish uchun qo'llaniladigan metodologiya keng qamrovli va doimiy rivojlanib boruvchi sohadir. Kalorimetriya, spektroskopiya, yagona molekula texnikalari kabi eksperimental usullar, molekulyar dinamika, kvant kimyoviy hisob-kitoblar, sun'iy intellekt va mashinani o'rganish kabi hisoblash yondashuvlari, shuningdek, no-muvozanat va axborot termodinamikasi kabi nazariy modellar birgalikda biologik jarayonlarning energetik asoslarini, ularning samaradorligini va evolyutsion ahamiyatini chuqur tahlil qilishga imkon beradi. Bu metodologiya, nafaqat hayotning fundamental mexanizmlarini tushunishda, balki tibbiyot, farmakologiya, biotexnologiya va ekologiya kabi amaliy sohalarda ham yangi yechimlarni ishlab chiqishda muhim rol o'ynaydi. Kelajakda bu usullarning yanada takomillashuvi va

integratsiyasi biologik murakkablikning yangi qirralarini ochib berishga xizmat qiladi, shu bilan birga yangi, yanada aniqroq va samaraliroq tadqiqot vositalarini yaratishga undaydi.

Xulosa

Biologik sistemalarni o‘rganishda termodinamika usullari hayotning murakkab mexanizmlarini tushunishda fundamental ahamiyatga ega ekanligi namoyish etildi. Muvozanat va no-muvozanat termodinamikasi tamoyillari metabolizm, oqsil buklanishi, membrana transporti, hujayraviy signalizatsiya va hatto ekologik jarayonlarning energetik asoslarini ochib beradi. Zamonaviy eksperimental (kalorimetriya, spektroskopiya, yagona molekula texnikalari) va hisoblash (MD, QM, AI/ML) usullari bu jarayonlarni atom darajasidan tortib, sistemaviy miqyosgacha chuqur tahlil qilishga imkon beradi. Bu yondashuvlar nafaqat nazariy tushunchalarni boyitadi, balki tibbiyot, farmakologiya va biotexnologiya kabi amaliy sohalarda ham yangi imkoniyatlar yaratadi. Kelajakda ushbu sohadagi tadqiqotlar tiriklikning sirli qirralarini yanada chuqurroq anglashga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Rahmatov M.N., Sobirova G.K. (2021). O'simlik hujayralarida stress omillari ta'sirida energetik metabolizmning termodinamik tahlili. Fan va texnologiyalar taraqqiyoti, (4), 120-125. – https://tstu.uz/uz/jurnal/

[2] Karimov A.B., Olimov D.S. (2020). Biologik tizimlarda modda va energiya almashinuvi: Biofizik va biokimyoviy asoslar. Fan nashriyoti.

[3] Xolmatov S.A. (2023). G'o'za navlarining sho'rga chidamliligini oshirishda bioenergetik jarayonlarning roli va ularni boshqarish usullari. Biologiya fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati. O'zbekiston Milliy universiteti.

[4] Ismoilov F.T., Saidova L.K. (2021). Mikroorganizmlar metabolizmining termodinamik tahlili: Biogaz ishlab chiqarish misolida. Kimyo va kimyo texnologiyasi, (2), 87-92. – https://tkti.uz/uz/ilmiy-tadqiqotlar/kimyo-va-kimyo-texnologiyasi-jurnali/

[5] G'aniyev N.M., Rustamova Z.R. (2022). Biofizik kimyo asoslari: Energetik jarayonlar va ularning biologik ahamiyati. Innovatsiya nashriyoti.

[6] Sobirov D.A., Karimova S.M. (2023). Odam organizmida modda almashinuvi buzilishlarining termodinamik aspektlari. Tibbiyotda yangi kun, (1), 112-117. – https://tma.uz/uz/tibbiyotda-yangi-kun-jurnali/

[7] Jo'rayev B.R., Saidova N.A. (2020). Fermentativ reaksiyalarning kinetik va termodinamik xususiyatlari. O'zbekiston kimyo jurnali, (5), 67-72. – https://chembio.uz/uz/uzbekiston-kimyo-jurnali/