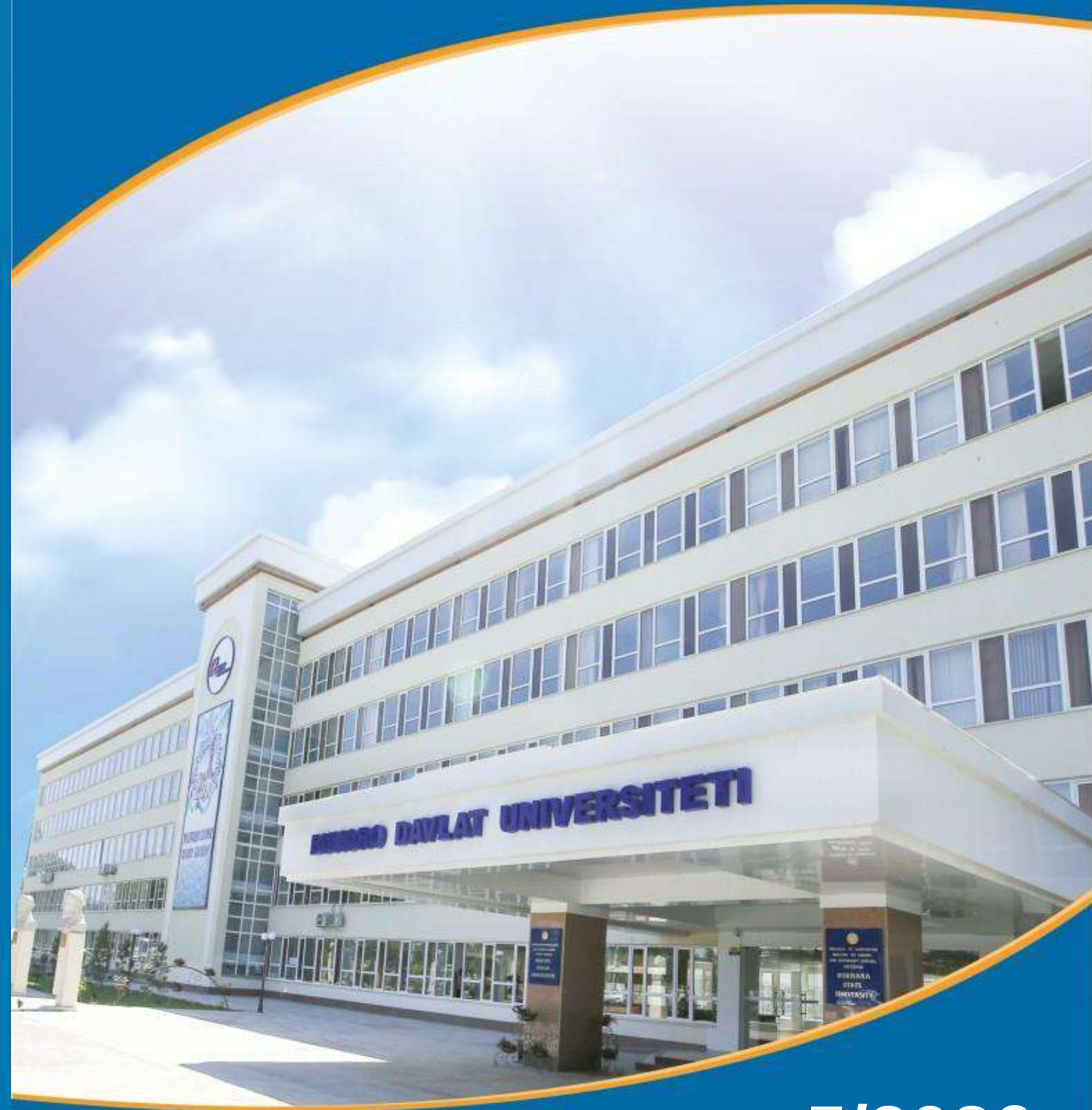


BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI



Научный вестник Бухарского государственного университета
Scientific reports of Bukhara State University

5/2026

E-ISSN 2181-1466



9 772181 146004

ISSN 2181-6875



9 772181 687004



@buxdu_uz



@buxdu1



@buxdu1



www.buxdu.uz

5/2026

BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI
SCIENTIFIC REPORTS OF BUKHARA STATE UNIVERSITY
НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК БУХАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Ilmiy-nazariy jurnal
2026, № 5, may

Jurnal 2003-yildan boshlab **filologiya** fanlari bo'yicha, 2015-yildan boshlab **fizika-matematika** fanlari bo'yicha, 2018-yildan boshlab **siyosiy** fanlar bo'yicha, **tarix** fanlari bo'yicha 2023-yil 29-avgustdan boshlab O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar Vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiya ishlari natijalari yuzasidan ilmiy maqolalar chop etilishi lozim bo'lgan zaruriy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Jurnal 2000-yilda tashkil etilgan.

Jurnal 1 yilda 12 marta chiqadi.

Jurnal O'zbekiston matbuot va axborot agentligi Buxoro viloyat matbuot va axborot boshqarmasi tomonidan 2020-yil 24-avgust № 1103-sonli guvohnoma bilan ro'yxatga olingan.

Muassis: Buxoro davlat universiteti

Tahririyat manzili: 200117, O'zbekiston Respublikasi, Buxoro shahri Muhammad Iqbol ko'chasi, 11-uy.

Elektron manzil: nashriyot_buxdu@buxdu.uz

TAHRIR HAY'ATI:

Bosh muharrir: Xamidov Obidjon Xafizovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bosh muharrir o'rinbosari: Samiyev Kamoliddin A'zamovich, texnika fanlari doktori (DSc), dotsent

Mas'ul kotib: Shirinova Mexrigiyo Shokirovna, filologiya fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Kuzmichev Nikolay Dmitriyevich, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor (N.P. Ogaryov nomidagi Mordova milliy tadqiqot davlat universiteti, Rossiya)

Danova M., filologiya fanlari doktori, professor (Bolgariya)

Margianti S.E., iqtisodiyot fanlari doktori, professor (Indoneziya)

Minin V.V., kimyo fanlari doktori (Rossiya)

Tashqarayev R.A., texnika fanlari doktori (Qozog'iston)

Mo'minov M.E., fizika-matematika fanlari nomzodi (Malayziya)

Mengliyev Baxtiyor Rajabovich, filologiya fanlari doktori, professor

Adizov Baxtiyor Rahmonovich, pedagogika fanlari doktori, professor

Rasulov To'liq Husenovich, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

Abuzalova Mexriniso Kadirovna, filologiya fanlari doktori, professor

Amonov Muxtor Raxmatovich, texnika fanlari doktori, professor

Barotov Sharif Ramazonovich, psixologiya fanlari doktori, professor, xalqaro psixologiya fanlari akademiyasining haqiqiy a'zosi (akademigi)

Baqoyeva Muhabbat Qayumovna, filologiya fanlari doktori, professor

Bo'riyev Sulaymon Bo'riyevich, biologiya fanlari doktori, professor

Jumayev Rustam G'aniyevich, siyosiy fanlar nomzodi, dotsent

Djurayev Davron Raxmonovich, fizika-matematika fanlari doktori, professor

Durdiyev Durdimurod Qalandarovich, fizika-matematika fanlari doktori, professor

Olimov Shirinboy Sharofovich, pedagogika fanlari doktori, professor

Qahhorov Siddiq Qahhorovich, pedagogika fanlari doktori, professor

Umarov Baqo Bafoyevich, kimyo fanlari doktori, professor

Murodov G'ayrat Nekovich, filologiya fanlari doktori, professor

O'rayeva Darmonoy Saidjonovna, filologiya fanlari doktori, professor

Navro'z-zoda Baxtiyor Nigmatovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Hayitov Shodmon Ahmadovich, tarix fanlari doktori, professor

To'rayev Halim Hojiyevich, tarix fanlari doktori, professor

Rasulov Baxtiyor Mamajonovich, tarix fanlari doktori, professor

Eshtayev Alisher Abdug'aniyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Quvvatova Dilrabo Habibovna, filologiya fanlari doktori, professor

Axmedova Shoir Nematovna, filologiya fanlari doktori, professor

Bekova Nazora Jo'rayevna, filologiya fanlari doktori (DSc), professor

Amonova Zilola Qodirovna, filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

Hamroyeva Shahlo Mirjonovna, filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

Nigmatova Lola Xamidovna, filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

Jamilova Bashorat Sattorovna, filologiya fanlari doktori, professor

Boboyev Feruz Sayfullayevich, tarix fanlari doktori

Jo'rayev Narzulla Qosimovich, siyosiy fanlar doktori, professor

Xolliyev Askar Ergashovich, biologiya fanlari doktori, professor

Artikova Hafiza To'ymurodovna, biologiya fanlari doktori, professor

Norboyeva Umida Toshtemirovna, biologiya fanlari doktori, professor

Hayitov Shavkat Ahmadovich, filologiya fanlari doktori, professor

Qurbonova Gulnoz Negmatovna, pedagogika fanlari doktori (DSc), professor

Ixtiyarova Gulnora Akmalovna, kimyo fanlari doktori, professor

Rasulov Zubaydullo Izomovich, filologiya fanlari doktori (DSc), dotsent

Mirzayev Shavkat Mustaqimovich, texnika fanlari doktori, professor

Esanov Husniddin Qurbonovich, biologiya fanlari doktori, dotsent

Raupov Soyib Saidovich, tarix fanlari nomzodi, professor

Zaripov Gulmurot Toxirovich, texnika fanlari nomzodi, professor

Jumayev Jura, fizika-matematika fanlari nomzodi, professor

Qurbonova Manzila Bakiyevna, tarix fanlari nomzodi, professor

Ochilov Alisher To'lis o'g'li, tarix fanlari doktori, dotsent

Klichev Qybek Abdurasulovich, tarix fanlari doktori, dotsent

G'aybulayeva Nafisa Izattullayevna, filologiya fanlari doktori (DSc), professor

O'rinova Bozorgul Zokirovna, tarix fanlari doktori, dotsent

SERIYA: ANIQ VA TABIIY FANLAR.

MUNDARIJA *** СОДЕРЖАНИЕ *** CONTENTS		
FIZIKA *** PHYSICS *** ФИЗИКА		
Nurmamatov Sh.E., Burxonov O.A., Ergashev S.Sh., Karimov R.G.	Toi-7365.01 (tic 120737368.01) tranzitining yer usti fotometrik kuzatuvlari va parametrlarini aniqlashtirish	4
Саидов С.О., Нуров М.М.	Структурно-морфологическое состояние объёма и поверхности в си-обработанном cz-si после высокотемпературной диффузии и закалки	11
Ахмеджанов Ф.Р., Нуждов Г.С.	Исследование анизотропии затухания акустических волн в кубических кристаллах типа NaCl численными методами	21
Erdosheva G.O.	O'tkinchi metall amorf qotishmalarida termoelektrik yurituvchi kuchning temperaturaga bog'liqligi	26
Тураев Ф.Ф., Болтаев Х.Х.	Каноническое представление вещественных факторов	30
Ташпулатова Д.Х., Урозов А.Н., Наркулов С.К.	Влияние температуры и излучения на электрические характеристики фотоэлектрического элемента	35
Саидханов Н.Ш.	Квазинуклонные взаимодействия в ядерной фотоэмульсии	43
Xamrayev Y.B., Victor G.Y.	Spectrum of variations of cosmic rays in the earth's orbit according to data from the AMS-02 magnetic spectrometer	51
To'lakova G.Y.	Sement kompozitining egiluvchanlik ko'rsatkichlarini yaxshilash uchun panjara va ichi bo'sh arxitekturalangan polimer armaturadan foydalanish	57
Temirov O.F., Ahadov A., Djurayev D.R.	Nbn nanoplyonkasidagi o'ta o'tkazuvchanlikning asosiy fizikaviy xossalari	62
Shuhratova L.O., Kabulov R.R.	Vakuum termik bug'lantirish usuli yordamida tayyorlangan CSPBBR3 noorganik perovskit qatlamlarining fotooptik xususiyatlari va ularning tahlili	67
Saidov S.O., Salimov T.B., Abdug'aniyev Y.A.	Si-eu tizimi sirt qatlamining fazaviy holati, infraqizil spektral xususiyatlari va morfologik notekisligi: xrd, ftir, sem va eds usullari asosidagi kompleks tahlil	71
Raxmanov U.M., Ashurova M.M., Aktamov M.A.,	Kremniyni Ga va Sb atomlari bilan ketma-ket legirlash va ularning optik xususiyatlarining modeli	49

Gadayev S.A., Samandaarov T.N.		
Saparbayev A.A., Shukurullayeva M.O‘., Sharopova G.M.	PBB-TSD:IT-4F va PBB-TSA:IT-4F tarkibga ega bo‘lgan faol qatlamlar asosidagi quyosh elementlarining xossalari	84
Эркинова Д.А.	Об одной нелинейной математической модели возникающей в двухжидкостной среде	97
Djurayev D.R., Fayziyev Sh.Sh., Radjabova M.S.	Kupratli o‘ta o‘tkazgichlarda T_c ning strukturaviy va fizik parametrlariga bog‘liqligini modellashtirish	102
Qodirov A.R., Namozova O.U., Jabborova M.O.	Niobiy yupqa plyonkalarining kristall tuzilishi va sirt morfologiyasi	110
Bobomurodov S.Sh., Nasirova N.G., Fayziyev Sh.Sh.	Granat tipidagi kristallning magnitooptik xossalari	118
Matnazarov A.R., Tashpulatova D.Kh., Narkulov S.K.	Hetero -structured solar photocells	126
Majidova G.N., Xusanboyev Sh.Z.	Yarimo‘tkazgich tranzistorlar asosida reaktiv quvvatni optimallashtirish va energiya samaradorligini oshirish	132
Ibodova M.I., Fayziyev Sh.Sh.	Ga ₂ Gd materiallarining umumiy xususiyatlari	138
Husenov R.K.	Temir asosidagi amorf qotishmalarning issiqlik xossalari	143
Himmatov I.F., Eshburiyev R., Mamatqulov O.B., Bahridinov B.A., Umarov Z.B.	Neytron qamrash terapiyasida doza taqsimotini geant4 yordamida modellashtirish	147
Kamilov Sh.X., Mirzaraximov S.X., Yunusov A.X., Abdullayev R.M.	Qo‘rg‘oshin tsirkonat-titanat kukunlarning elektrofizik xossalarini tadqiq etish	152
Ibrohimov V.U., Mavlonova M.G‘., Soliyev T.I.	Tuproq tarkibidagi tabiiy radionuklidlarni (²²⁶ Ra, ²³² Th, ⁴⁰ K) aniqlashning gamma-spektrometrik usuli	159
Арзикулов Ф.Ф., Мустафакулов А.А., Саидов С.О., Игамов Б.Дж., Косимов И.О., Хушбаков Б.Э.	Влияние гамма-облучения на электрофизические и зонные свойства тонких плёнок ZnO/Si, Cu ₂ O/Si И CuO/Si	164

Nomozova D.M., Buxarova S.B.	Yerga xavf soluvchi kichik sayyoralarning statistik tahlili	175
Mamarasulova H.D.	Uglevod atomlarining kremniy monokristallarida kislorod komplekslarining hol bo'lishiga ta'siri	181
Sunnatova S.H., Ibrohimov V.U., Soliyev T.I.	Navoiy viloyati hududidagi suvlarning radioaktivligini aniqlash va baholash	186
Каландаров А.А., Каландаров А.	Двумерная связанная динамическая задача термоупругости в напряжениях для изотропных тел	191
BIOLOGIYA *** BIOLOGY *** БИОЛОГИЯ		
Ҳасанов И.Ҳ.	Шўрланган гидроморф тупроқларда ғўзага азотли ўғитларни киритишнинг таъсири	199
Evatov G'.X., Eshmurodova Z.	Arpa va uning kimyoviy tarkibi	203
Jurayev R.S., Umurkulova F.S., Suyunova L.A., Misirova S.A.	Oziq-ovqat mahsulotlaridagi biogen aminlarni aniqlashning xromatografik kemometrik usullari	207
Umurkulova F.S., Djurayev T.A., Vafojeva N.I.	Jo'xori kepagi tarkibidagi aminokislotaslar miqdorini aniqlash	214
Jurayev R.S., Umurkulova F.S., Suyunova L.A., Abdusamatova M.A.	Oziq-ovqat mahsulotlaridagi kimyoviy ifloslanishlarni aniqlash va baholashda zamonaviy analitik metodlar	219
INFORMATIKA *** INFORMATICS *** ИНФОРМАТИКА		
Shirinov Z.Z., Jumayeva G.B.	Numpy kutubxonasining suyuqlik va gaz mexanikasi masalalaridagi qo'llanilish imkoniyatlari	226
O'rinov N.T., Tadjibayeva N.Sh.	Axborot xavfsizligi darajasini baholashning statistik usullarini qiyosiy tahlil qilish	230
Fozilova M.A.	Digitalization and the extensive integration of information and communication technologies	235
TEXNIKA *** TECHNIQUE *** ТЕХНИКА		
Toshboboyev Sh.M.	Metrologik ta'minot orqali elektr mahsulotlarining sifatini aniqlash	230

TOI-7365.01 (TIC 120737368.01) TRANZITINING YER USTI FOTOMETRIK KUZATUVLARI VA PARAMETRLARINI ANIQLASHTIRISH

Nurmamatov Sheroz Eraliyevich,

*Chirchiq davlat pedagogika universiteti katta o‘qituvchisi, Ulug‘bek nomidagi
Astronomiya instituti kichik ilmiy xodimi*

sheroznurmamatov@gmail.com

Burxonov Otabek Anvarjonovich,

Ulug‘bek nomidagi Astronomiya instituti katta ilmiy xodimi

boa@astrin.uz

Ergashev Salohiddin Shavkat o‘g‘li,

Samarqand davlat universiteti kichik ilmiy xodimi

ergashev.salohiddin@bk.ru

Karimov Rivkat Giratovich,

Ulug‘bek nomidagi Astronomiya instituti katta ilmiy xodimi

Annotatsiya. Mazkur tadqiqotda TESS missiyasi doirasida aniqlangan TOI-7365.01 (TIC 120737368.01) nomzod ekzosayyorasining tranzit hodisasi Maydanak observatoriyasida olingan fotometrik kuzatuvlar asosida tahlil qilindi. Kuzatuvlar Zeiss-600 (NT-60) teleskopida I-filtrda amalga oshirildi. Ravshanlik egri chiziqlari differensial fotometriya usuli yordamida qayta ishlanib, AstroImageJ dasturida Mandel–Agol modeli asosida modellashirildi. Nomzod ekzosayyoraning tranzit chuqurligi, davomiyligi va markaziy vaqti aniqlanib, natijalar TESS ma’lumotlari bilan solishtirildi. Olingan parametrlar obyektning Yupiter-radiusga yaqin gaz gigant ekanligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: Ekzosayyora, fotometriya, tranzit usuli, Maydanak observatoriyasi, TOI-7365.01, TIC 120737368.01, ZAQ tasvirlar, AstroImageJ, ravshanlik egri chizig‘i, TESS, differensial fotometriya.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИТА TOI-7365.01 (TIC 120737368.01)

Аннотация. В данном исследовании на основе фотометрических наблюдений, полученных в Майданакской обсерватории, был проанализирован транзитный инцидент кандидата в экзопланеты TOI-7365.01 (TIC 120737368.01), обнаруженный в рамках миссии TESS. Наблюдения проводились на телескопе Zeiss-600 (NT-60) с I-фильтром. Кривые блеска обрабатывались методом дифференциальной фотометрии и моделировались в программе AstroImageJ на основе модели Манделя-Агола. Были определены глубина транзита, длительность и центральное время транзита кандидата в экзопланеты, а результаты сравнивались с данными TESS. Полученные параметры указывают на то, что объект является газовым гигантом с радиусом, близким к радиусу Юпитера.

Ключевые слова: экзопланета, фотометрия, транзитный метод, обсерватория Майданак, TOI-7365.01, TIC 120737368.01, изображения ZAQ, AstroImageJ, кривая яркости, TESS, дифференциальная фотометрия.

DETERMINATION OF TERRESTRIAL PHOTOMETRIC OBSERVATIONS AND PARAMETERS OF TRANSIT TOI-7365.01 (TIC 120737368.01)

Abstract. In this study, the transit event of the candidate exoplanet TOI-7365.01 (TIC 120737368.01), detected within the framework of the TESS mission, was analyzed based on photometric observations obtained at the Maidanak Observatory. The observations were made on the Zeiss-600 (NT-60) telescope with an I-filter. The light curves were processed using the differential photometry method and modeled in the AstroImageJ program based on the Mandel–Agol model. The transit depth, duration, and central time of the candidate exoplanet were determined, and the results were compared with TESS data. The obtained parameters indicate that the object is a gas giant with a radius close to Jupiter.

Key words: Exoplanet, photometry, transit method, Maidanak Observatory, TOI-7365.01, TIC 120737368.01, ZAQ images, AstroImageJ, brightness curve, TESS, differential photometry.

Kirish. So‘nggi o‘n yilliklarda zamonaviy astrofizika va planetologiyaning eng jadal rivojlanayotgan yo‘nalishlaridan biri — ekzosayyoralar kashfiyoti va ularning fizik-kimyoviy xususiyatlarini o‘rganish bo‘ldi. 1990-yillarning o‘rtalarida Quyosh tipidagi yulduzlar atrofida birinchi sayyoralar aniqlanganidan buyon, koinot manzarasi va undagi o‘rnimiz haqidagi tasavvurlar tubdan o‘zgardi. Hozirgi kunda ekzosayyoralar bir qancha usullar orqali aniqlansa-da, tranzit fotometriyasi eng samarali va natijador usul bo‘lib qolmoqda [1]. Mazkur usulning mohiyati sayyoraning o‘z ona yulduzi diski oldidan o‘tishi natijasida yulduz yorqinligining davriy pasayishini qayd etishga asoslanadi.

Ekzosayyoralar tadqiqotida *Kepler* missiyasidan so‘ng muhim burilish yasagan TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) kosmik teleskopi butun osmon sferasini sektorlarga bo‘lib skanerlash [11] orqali yorqin yulduzlar atrofida tranzit nomzodlarini (TOI) aniqlashga xizmat qiladi [2]. Biroq, TESS kameralari piksellarining nisbatan yirik o‘lchami kuzatuv ma’lumotlarida qo‘shni yulduz tarqatayotgan yorug‘lik oqimlarining aralashuvi (blending) muammosini keltirib chiqaradi. Xususan, piksel maydoniga maqsadli yulduzdan tashqari fon obyektlari, jumladan, tutiluvchi qo‘shaloq yulduzlar (NEB - *Nearby Eclipsing Binaries*) tushib qolsa, ularning tutilishi asosiy yulduz nuri bilan qo‘shilib, sayyora tranzitini imitatsiya qiluvchi yolg‘on ijobiy (*false positive*) signallarni hosil qiladi [12]. Shu sababli, TESS orqali qayd etilgan fotometrik pasayishlarning barchasi ham haqiqiy ekzosayyora tasdig‘i bo‘la olmaydi va ular qo‘shimcha yer usti kuzatuvlarini talab etadi.

TESS kosmik teleskopining texnik cheklovlarini bartaraf etish va nomzod obyektlarni tasdiqlashda yuqori fazoviy ajratishga (*spatial resolution*) ega yerusti teleskoplari tarmog‘idan foydalanish strategik ahamiyat kasb etadi. Shu maqsadda tashkil etilgan TFOP (*TESS Follow-up Observing Program*) xalqaro hamkorlik dasturining SG1 (*Sub Group 1*) ishchi guruhi bevosita yer usti fotometriyasi orqali yolg‘on ijobiy signallarni inkor etish va sayyora parametrlarini aniqlashtirishga ixtisoslashgan. Yer usti teleskoplarining fazoviy ruxsati odatda 1-2 yoy soniyasini tashkil etadi (TESS piksellaridan 10-20 barobar aniqroq). Bu esa maqsadli yulduzni fon manbalaridan ajratish hamda tranzit hodisasi haqiqatan ham asosiy yulduzda yuz berayotganini ishonchli tasdiqlash imkonini beradi [3]. Mazkur tadqiqot doirasida o‘rganilayotgan TOI-7365.01 tizimi ham aynan shu maqsadda O‘zbekiston Fanlar akademiyasi Astronomiya institutining Maydanak astronomik observatoriyasi (MAO) kuzatuv dasturiga kiritilib, uning fotometrik tahlili amalga oshirildi [4].

TOI-7365 yulduzining asosiy fizik va katalog ma’lumotlari. TOI-7365 yulduzi TESS missiyasida TIC 120737368 identifikatori bilan qayd etilgan ekzosayyorali tizimlarga nomzod tizim bo‘lib, ekvatorial koordinatalari (J2000) quyidagicha: $\alpha = 23^h 36^m 57.11^s$, $\delta = +27^\circ 54' 25.3''$.

Obyekt bir qator astrometrik va fotometrik kataloglarda ham ro‘yxatga olingan: 2MASS J23365709+2754251, APASS 47895754, Gaia DR2 2866059203068680192, Gaia DR3 2866059203068680192, SDSS DR9 1237680307478724713, TOI-7365, UCAC4 590-139059, WISE J233657.10+275425.0.

TESS ma’lumotlariga ko‘ra yetakchi yulduzning ko‘rinma yulduz kattaligi $m_{TESS} = 13.2497 \pm 0.0081^m$ ga teng. 2MASS infraqizil K-diapazonida esa $m_{2MASS_K} = 12.27 \pm 0.023^m$ ni tashkil etadi.

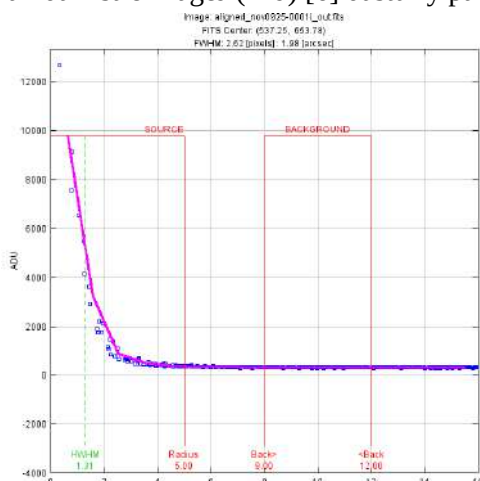
TESS katalogida [13] ushbu yulduzning samarali harorati $T_{eff} \approx 5964 \pm 122 \text{ K}$, massasi $M_* \approx 1.09 M_\odot$, radiusi $R_* \approx 1.25517 R_\odot$, sirt gravitatsiyasi $\log g \approx 4.27809 \text{ (cgs)}$, yulduzning o‘rtacha zichligi $\rho_* \approx 0.7772 \text{ g/cm}^3$, ravshanligi $L_* \approx 1.795 L_\odot$ teng ekanligi keltirilgan. Mazkur parametrlar tranzit modelini hosil qilishda boshlang‘ich (prior) parametr sifatida foydalanilishi, sayyora radiusi va orbital geometriyasini aniqlashda muhim rol o‘ynaydi.

Kuzatuvlar. TOI-7365.01 tranzit hodisasining Yer usti fotometrik kuzatuvlari MAO da olib borildi. Qashqadaryo viloyatining tog‘li hududida, dengiz sathidan 2593 metr balandlikda joylashgan ushbu observatoriya butun Yevroosiyo qit‘asidagi eng yaxshi astroiklim sharoitlariga ega bo‘lgan ilmiy markazlardan biri sanaladi. Observatoriyaning baland tog‘li joylashuvi Yer atmosferasining qalin va zich qatlamlaridan hamda chang-to‘zonlardan yuqorida bo‘lishni ta‘minlaydi. Yil davomidagi ochiq (bulutsiz) tunlar sonining ko‘pligi (yiliga taxminan 250-260 ta toza tun) va atmosferaning noyob barqarorligi (seeing) bu yerni ekzosayyora tranzitlari kabi yuqori fotometrik aniqlik talab qilinadigan tadqiqotlar uchun ideal maskanga aylantiradi. TOI-7365.01 obyektining kuzatuvlari observatoriyada o‘rnatilgan Zeiss-600 (NT-60) teleskopida 2025-yil 9-noyabr kuni amalga oshirildi. Kuzatuvlar davomida I filtrida 60 sekundlik ekspozitsiya bilan jami 274 ta ishchi ZAQ (zaryadli aloqa qurilma) tasvirlari olindi.

NT-60 teleskopining bosh ko‘zgusi diametri 60 sm, fokus masofasi 7500 mm ni tashkil etadi. Yorug‘lik qabul qilgich sifatida Andor iKon-L936 ZAQ kamerasi qo‘llanildi. Mazkur kamera 2048×2048

piksel o'lchamli ZAQ matritsaga ega bo'lib, bitta pikselning fizik o'lchami 13.5 μm ni tashkil etadi. Tizimning ko'rish maydoni (FOV) 12.8x12.8 yoy minut, o'qib olish shovqini (readout noise) 7.7 e^- , kuchaytirish koeffitsiyenti (gain) 2.2 e^-/ADU ga teng. Kuzatuv kechasida mos ravishda bias, dark va flat yordamchi tasvirlar olindi. Dark tasvirlar ishchi kadrlar bilan bir xil 60 sekundlik ekspozitsiya vaqti bilan, flat tasvirlar esa I filtrda kuzatildi. Kuzatuvlar obyektning yuqori kulminatsiya vaqtiga to'g'ri kelib, past xavo massasi (airmass) sharoitida olib borildi. Bu atmosfera ekstinksiyasi va dispersiyaga bog'liq sistematik xatoliklarning minimal darajada bo'lishini ta'minladi [5].

ZAQ tasvirlarga ishlov berish va fotometriya. Kuzatuvdan olingan xom (raw) ZAQ astronomik tasvirlari to'g'ridan to'g'ri ilmiy xulosalar chiqarish uchun yaroqli emas. Ular tarkibida teleskop optikasining tizimli xatolari, ZAQ matritsasining fizik nuqsonlari va elektron shovqinlar mavjud bo'ladi. Ularni tozalash maqsadida tasvirlarga standart astronomik algoritmlar asosida birlamchi ishlov berildi (Image Calibration). Bu murakkab bosqich jahon miqyosida tan olingan IRAF [14] (Image Reduction and Analysis Facility) hamda AstroImageJ (AIJ) [6] dasturiy paketlari yordamida quyidagi tartibda amalga oshirildi:



1-rasm. Yulduz radial profili va apertura o'lchamlari.

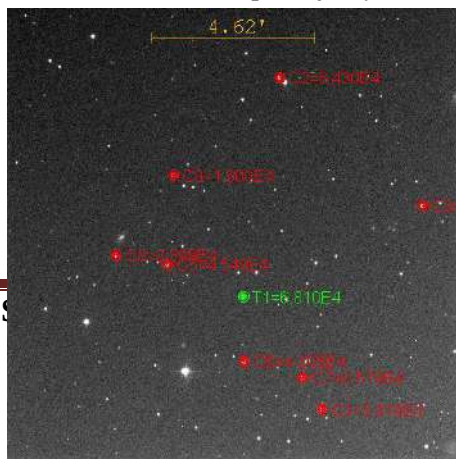
ajralishi davom etadi va bu ajralish ekspozitsiya vaqtiga to'g'ri proporsional bo'ladi, ekspozitsiya vaqti qancha katta bo'lsa shuncha ko'p elektron ajralib shovqin hosil qiladi. Bizni tadqiqot obyektimiz 60 soniyali ekspozitsiyada kuzatilganligi sababli biz 60 soniyali beshtadan ko'p dark tasvirlarni birlashtirib o'rtacha "Super Dark" tasvir hosil qilindi va u xom tasvirlardan ayriladi.

3. Maydon notekisligini to'g'rilash (Flat Fielding): Teleskop optik tizimidagi muammolar, ZAQ matritsa va/yoki yorug'lik filterlari yuzasidagi chang zararlari, hamda ZAQ matritsasi sezgirligining piksellar bo'ylab har xilligi tasvirdagi yorug'likning notekis taqsimlanishiga olib keladi. Bu notekislikni tuzatish uchun olinadigan tasvirlar flat tasvirlar deyiladi. Flat tasvirlarni olish ushuncha paytidagi yulduzsiz osmon qismi kuzatiladi va bu kuzatuvlar foydalanilayotgan yorug'lik filteriga bog'liq bo'ladi. Bir xil filterda olingan uchtdan ko'p flat tasvirlarni o'rtachasidan yagona "Super Flat" tasvir hosil qilinadi. Barcha xom tasvirlar shu Super Flat tasvirga bo'linadi. Bizni holatga yorug'lik filteri sifatida I-filtridan foydalanilgan.

Ushbu ketma-ket qadamlar natijasida quyidagi formula asosida toza, kalibrlangan tasvirlar I_{kal} hosil qilinadi:

$$I_{kal} = \frac{I_0 - S_{bias} - S_{dark}}{S_{flat}}$$

Kalibrlangan ishchi tasvirlar ketma-ketligidan tadqiqot obyektimizning ravshanlik egri chizig'ini olish va fotometrik tahlil qilish jarayoni vaqt qatorlari fotometriyasi uchun ixtisoslashgan AIJ dasturiy ta'minoti yordamida amalga oshirildi [6]. Fotometrik o'lchovlar uchun aperturalar usuli qo'llanildi. Kuzatuv ma'lumotlaridagi yulduzlar radial profil tahliliga ko'ra, FWHM ko'rsatkichi o'rtacha 1,31 pikselni tashkil etdi (1-rasm). Bu yulduz nurining asosiy qismi juda kichik maydonga to'planganligini va kuzatuvlar vaqtida tasvir sifati (seeing) yuqori darajada bo'lganligini tasdiqlaydi.



Shunga mos ravishda, dasturda fotometrik apertura va fon o'lchash halqalari parametrlari (fap) 5-8-12 piksellar etib belgilandi:

- Obyekt aperturasi (radius=5 piksel): FWHM 1,31 piksel bo'lgan sharoitda, ushbu radius TOI-7365 yulduzidan kelayotgan barcha samarali fotonlarni qamrab olish bilan birga, atrof-muhit shovqinlarini aperturaga kirishini cheklash uchun yetarli bo'ldi.

2-rasm. TOI-7365.01 va tayanch yulduzlarining ko'rish maydonidagi joylashuvi

Atmosfera shaffofligining o'zgaruvchanligi sababli yuzaga keladigan xatoliklarni bartaraf etish maqsadida AIJ orqali ko'p aperturali differensial fotometriya amalga oshirildi. Bunda TOI-7365.01 ning (T1) oqimi tasvir maydonidagi o'zgarmas tayanch yulduzlariga (C2, C3, C4, ..., C9) nisbatan me'yorlashtirildi (2-rasm) va solishtirma yulduz kattaligi olindi.

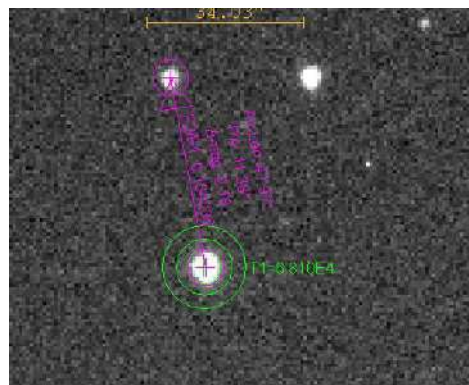
Maydon tasviri (3-rasm) tahlili shuni ko'rsatdiki, TOI-7365.01 ning (T1) yonida 41".97 uzoqlikda, ravshanligi $\Delta m = 2^m.18$ magnitudaga farq qiluvchi yana bir fon yulduzi joylashgan. Biroq, ushbu obyekt 12 piksellik fon o'lchash halqasidan yetarlicha uzoqda joylashganligi sababli fotometrik natijalarni ifloslantirmasligi kafolatlandi.

Birlamchi olingan differensial ravshanlik egri chizig'i o'zida turli xil instrumental va atmosfera xatoliklarini mujassam etganligi sababli ma'lum darajada shovqinli bo'ladi. Ushbu xatoliklarni bartaraf etish maqsadida AIJ dasturida chiziqli regressiya asosida tizimli xatolarni modellashtirish amaliyoti qo'llanildi.

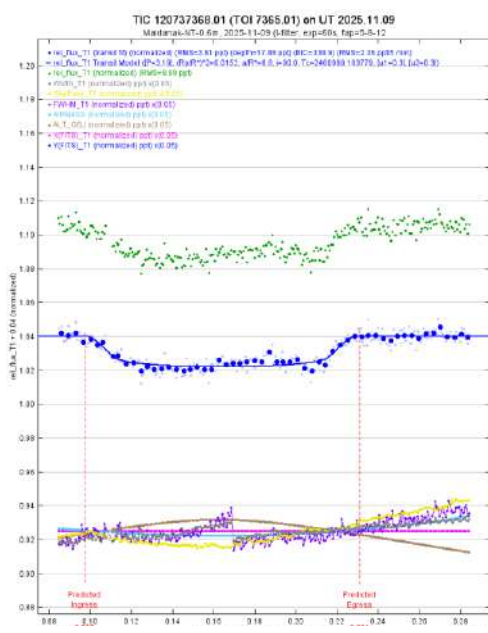
Dastur konfiguratsiyasi va grafik tahliliga (4-rasm) muvofiq, detrending jarayonida ikkita asosiy parametr tanlab olindi:

- Havo massasi (AIRMASS): Kuzatuv davomida zenit masofasining o'zgarishi sababli yuzaga keladigan qoldiq ta'sir (yulduzlar rangidagi farqlar natijasidagi ikkinchi tartibli ekstinksiya) regressiya tahlili yordamida aniqlanib, modeldan chegirib tashlandi.

- Osmon foni (Sky/Pixel_{T1}): Oy chiqishi yoki yorug'lik ifloslanishi tufayli osmon yorqinligining o'zgarishi qabul qilgich piksellaridagi fotonlar hisobotiga ko'rsatadigan bevosita ta'siri inobatga olindi va bartaraf etildi.



3-rasm. Maqsadli yulduz (T1) va unga eng yaqin fon yulduzining tahlili



4-rasm. TOI-7365.01 tranzitining tizimli xatolardan tozalangan ravshanlik egri chizig'i

Ushbu parametrlar tranzit modeliga chiziqli koeffitsiyentlar sifatida kiritildi va Nelder-Mead (Chi-squared) minimallashtirish algoritmi yordamida ravshanlik egri chizig'ini me'yorga keltirish uchun foydalanildi. Natijada, dastlabki o'rtacha kvadratik chetlanish (RMS) qiymati 8.98 ppt bo'lgan bo'lsa, detrend jarayonidan so'ng bu ko'rsatkich keskin yaxshilanib, 3.807 ppt gacha pasaytirildi (4-rasmga qarang). Shuningdek, ma'lumotlarni qayta ishlash davomida AIJ dasturining Kepler Spline usulida filtrlash funksiyasi orqali chetlanishlar, yani kosmik nurlar yoki apparat nuqsonlari tufayli yuzaga kelgan keskin chetga chiqishlar tozalandi [6].

Tranzit modeli va efemerida tahlili. Tranzit jarayoni natijasida hosil bo'lgan ravshanlikning tushish grafigi shunchaki empirik nuqtalar to'plami emas, balki qat'iy geometrik va fizik qonuniyatlarga tayanuvchi, analitik jihatdan yechimga ega bo'lgan funksional bog'lanishdir. Sayyora va yulduz fizikasiga oid ko'plab raqamlarni aniq hisoblab chiqish maqsadida AIJ dasturiga o'rnatilgan Mandel va Agol (2002) nazariy tranzit modelidan keng foydalanildi [1]. Mandel va Agol usuli o'z ichiga elliptik integrallar qatorini oladi va yulduz qirra qorayishining chiziqli, kvadratik yoki chiziqli bo'lmagan (non-linear) funksiyalarini aniq yechimlarini

modellash tira oladi. Bu algoritmlar orqali moslashtirish jarayoni (fitting) amalga oshirildi [7].

TOI-7365.01 obyektining normallashtirish ravshanlik egri chiziqlari AIJ dasturida analitik tranzit modeli asosida moslashtirildi. Modelda sayyora–yulduz geometriyasi, orbit og‘ish burchagi hamda yulduz diskining limb-darkening [15] effekti hisobga olindi. Tranzit modellash tishda yetakchi yulduzning yuqorida keltirilgan fizik parametrlaridan ($T_{eff}, M_*, R_*, \log g$) boshlang‘ich parametrlar sifatida foydalanildi.

Tranzitni modellash tishda sayyoraning orbital davri $P = 3.1924816$ kun TESS efemerida ma’lumotlariga muvofiq o‘zgarmas (fixed) parametr sifatida qabul qilindi. Tranzit profilini to‘liq tavsiflash uchun quyidagi parametrlar erkin o‘zgaruvchi (free parameters) sifatida moslashtirildi:

- tranzit markaziy vaqti (T_c);
- sayyora va yulduz radiuslari nisbati ($(\frac{R_p}{R_*})^2$);
- yarim katta o‘qning yulduz radiusiga nisbati ($\frac{a}{R_*}$);
- orbita og‘ish burchagi (i).

Yulduz diskining qirra qorayishi (limb-darkening) koeffitsiyentlari (u_1 va u_2) TOI-7365.01 ning yetakchi yulduzi samarali harorati (T_{eff}) va sirt gravitatsiyasi ($\log g$) qiymatlariga asoslanib, Claret & Bloemen nazariy jadvallaridan I-filtr uchun interpolatsiya qilindi [8]. Ushbu koeffitsiyentlar tranzit profilining tub qismi shaklini aniq modellash tishda muhim rol o‘ynaydi.

Instrumental va atmosfera sistematik xatoliklarini kamaytirish maqsadida, yuqorida ta’kidlanganidek, ravshanlik egri chiziqlari havo massasi va osmon foni parametrlariga nisbatan bir vaqtning o‘zida me’yorga keltirildi. Modelning kuzatuv ma’lumotlariga moslik darajasi normallashtirish o‘rta kvadratik chetlanish (RMS) hamda kamaytirilgan statistik χ^2_{red} (χ^2/dof) ko‘rsatkichlari orqali baholandi [10].

AIJ dasturida differensial ravshanlik egri chizig‘ini analitik modellash tish natijasida TOI-7365.01 obyektining asosiy fizik va orbital parametrlari yuqori aniqlikda belgilandi. Modellash tish jarayonida olingan parametrlar va ularning ExoFOP TESS ma’lumotlari bilan solishtirilgan sonli qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. TOI-7365.01 tranzit parametrlarining Maydanak observatoriyasi kuzatuvlari asosida olingan natijalari va katalog qiymatlari taqqoslanishi

Parametr	09.11.2025 (MAO)	ExoFOP TESS
Orbital davr, P (kun)	3.1924816 (o‘zgarmas)	3.1924816 (o‘zgarmas)
$(R_p/R_*)^2$	0.015219179	-
a/R_*	8.76713	-
Tranzit markaziy vaqti, T_c (BJD)	2460989.163779	2460580.641468
Og‘ish burchagi, i (°)	89.99	-
Tranzit davomiyligi T_{14} (kun)	0.13047	0.13379
Tranzit chuqurligi “Depth” (ppt)	17,88	15.438758
Ekzosayyora radiusi R_p (R_{Jup})	1.33	1.29885
u_1	0.3	-
u_2	0.3	-
χ^2_{red}	1.15	-
RMS (norm.)	0.003807	-

AIJ orqali yaratilgan tranzit modelining ilmiy ishonchligi uning statistik sifat ko‘rsatkichlari bilan tasdiqlanadi:

1. Normallashtirilgan RMS: 0.003807 (yoki 3.807 ppt). Kichik diametrli (0.6 m) yer usti teleskopi uchun 3.807 ppt (~0.38%) RMS aniqligiga erishish Maydanak observatoriyasining barqaror astroiqlimi hamda tasvirlarga yuqori darajada ishlov berilganligidan dalolat beradi.

2. Kamaytirilgan χ^2 (Reduced Chi-squared, χ^2_{red}): 1.15 Keltirilgan χ^2 ning 1.0 ga yaqin bo‘lishi Mandel-Agol modeli olingan kuzatuv ma’lumotlariga sun’iy moslashtirilmasdan (overfitting), fizik jihatdan aniq muvofiqlashganini bildiradi.

Tranzit markaziy vaqtining T_{calc} TESS loyihasi tomonidan taqdim etilgan efemerida bilan mosligini tekshirish maqsadida O–C (*Observed minus Calculated*) farqlari tahlil qilindi [9]. Hisoblash quyidagi chiziqli efemerida formulasi asosida bajarildi:

$$T_{calc}(E) = T_0 + E \cdot P$$

$$O - C = T_{obs} - T_{calc}$$

Bu yerda T_0 – TESS katalogi bo'yicha boshlang'ich tranzit epoxasi (2460580.641468 BJD), P – orbital davr (3.1924816 kun), E – tranzit epoxasi, T_{obs} – Maydanak observatoriyasida kuzatilgan tranzit markaziy vaqti (2460989.163779 BJD) va T_{cal} – formulaga asosan kutilgan nazariy vaqt (2-jadval).

2-jadval. TOI-7365.01 obyektining O–C tahlil natijalari

Kuzatuv	T_{OBS} (BJD)	Epox (E)	T_{CALC} (BJD)	(O-C) (Kun)	(O-C) (soat)
Tess	2460580.641468	0	2460580.641468	0	0
24.10.2025	2460989.163779	128	2460989.279113	-0.115334	-2.76

TOI-7365.01 obyektining Maydanak observatoriyasida kuzatilgan tranzit markaziy vaqti ($T_{obs} = 2460989.163779$ BJD) TESS efemeridasi asosida hisoblangan qiymat ($T_{calc} = 2460989.279113$ BJD) bilan taqqoslanganda $(O - C) = -0.115334$ kun (–2.76 soat) og'ish mavjudligi aniqlandi. Manfiy ishorali og'ish kuzatilgan tranzit hodisasining kutilgan vaqtga nisbatan oldinroq sodir bo'lganini ko'rsatadi.

Mazkur farq orbital davrning uzoq vaqt oralig'ida kichik xatoliklar bilan aniqlanishi natijasida yuzaga kelgan efemerida noaniqliklari bilan izohlanishi mumkin. Hozirgi natija tranzit vaqtlarining aniqligini oshirish va efemeridani yangilash zarurligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, mavjud ma'lumotlar asosida tranzit vaqtlaridagi variatsiyalarni (TTV) statistik jihatdan ishonchli deb baholash uchun yetarli asos mavjud emas.

Shu sababli, obyekt uchun qo'shimcha tranzit kuzatuvlarini turli epoxalarda amalga oshirish hamda yangi tranzit markaziy vaqtlarini yig'ish kelgusida efemerida parametrlarini aniqlashtirish va tranzit vaqtlarining dinamikasini chuqurroq tahlil qilish imkonini beradi.

Xulosa. TOI-7365.01 (TIC 120737368.01) nomzod ekzosayyorasining tranzit hodisasi MAO ning Zeiss-600 (NT-60) teleskopida olingan yuqori aniqlikdagi fotometrik kuzatuvlar asosida tahlil qilindi. 2025-yil 9-noyabr kuni I-filtrda 60 sekundlik ekspozitsiya bilan olingan 274 ta ZAQ tasvirlari differensial fotometriya usuli yordamida qayta ishlanib, AIJ dasturida Mandel–Agol modeli asosida modellashirildi.

Fotometrik qayta ishlash natijasida dastlabki shovqin darajasi $RMS \approx 8.98$ ppt dan detrendingdan so'ng 3.807 ppt gacha kamaytirildi, bu esa yer usti kuzatuvlari uchun yuqori aniqlik darajasini ko'rsatadi. Tranzit model asosida sayyora–yulduz tizimining asosiy parametrlariga aniqlik kiritildi: $(R_p/R_*)^2 \approx 0.0152$, $a/R_* \approx 8.77$, orbital og'ish burchagi $i \approx 89.99^\circ$ hamda tranzit davomiyligi $T_{14} \approx 0.13047$ kun ekanligi aniqlandi. Sayyora radiusi $R_p \approx 1.33 R_{Jup}$ bo'lib, bu obyektning gaz gigant – Yupiter sinfiga mansubligini tasdiqlaydi.

Tranzit markaziy vaqti uchun bajarilgan O–C tahlili natijasida kuzatilgan qiymat bilan TESS efemeridasi asosida hisoblangan vaqt o'rtasida $(O - C) = -0.115334$ kun (≈ -2.76 soat) og'ish mavjudligi aniqlandi. Bu og'ish tranzit hodisasining kutilgan vaqtdan oldin sodir bo'lganini ko'rsatadi va efemerida parametrlarining vaqt o'tishi bilan aniqligini yo'qotishini ko'rsatadi. Shu sababli, TOI-7365.01 tizimi uchun efemeridani qayta aniqlash zarurati yuzaga keladi va bu tizimda hali aniqlanmagan sayyoralar mavjudligi muammosiga oydinlik kiritadi.

ADABIYOTLAR:

1. Mandel K., Agol E. *Analytic light curves for planetary transit searches. The Astrophysical Journal Letters*. 2002 Dec 1;580(2):L171-5.
2. Ricker, George R., et al. "Transiting exoplanet survey satellite." *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 1.1 (2015): 014003-014003.
3. Ergashev S.Sh., Sanaqulov Sh.M., Boymurodova R.A. *Maydanak observatoriyasida ekzosayyoralar kuzatuvi. Buxoro davlat universiteti Ilmiy axborotnomasi*. – 2024. – Buxoro. – №. 9. – b. 70-75.
4. Ehgamberdiev S. *Modern astronomy at the Maidanak observatory in Uzbekistan //Nature Astronomy*. – 2018. – T. 2. – №. 5. – pp. 349-351.

5. Osborn J. et al. *Atmospheric Scintillation in Astronomical Photometry* // MNRAS Volume 452, Issue 2, p.1707-1716 2015.
6. Collins, K. A., et al. *AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction*. AJ, 153, 77, 2017.
7. Pál A. *Properties of analytic transit light-curve models*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2008 Oct 11;390(1):281-8.
8. Claret, A., & Bloemen, S. (2011). *Gravity and limb-darkening coefficients for the Kepler, CoRoT, Spitzer, uvby, UBVRIJHK, and Sloan photometric systems*. Astronomy & Astrophysics, 529, A75.
9. Sterken, C. (2005). *The O-C diagram: basic procedures*. The Light-Time Effect in Astrophysics: Causes and cures of the O-C diagram, ASP Conference Series, Vol. 335, p. 3.
10. Ergashev S.Sh, Burxonov O.A., Karimov R.G., Sanaqulov S.M. *TRES-1 b va QATAR-1 b ekzosayyoralarning ravshanlik egri chizig'i tahlili natijalari*. Issue 3 of 2023 (139/1). 2023 May 30;3(132):5-11.
11. <https://tess.mit.edu/observations/sector-42/>
12. <https://tess.mit.edu/followup/>
13. <https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/target.php?id=120737368>
14. <https://iraf-community.github.io/>
15. https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-3-642-11274-4_885

СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОБЪЁМА И ПОВЕРХНОСТИ В CU-ОБРАБОТАННОМ CZ-SI ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИФФУЗИИ И ЗАКАЛКИ

Саидов Сафо Олимович,

кандидат химических наук, доцент кафедры физики

Бухарского государственного университета

safo.saidov.64@mail.ru

Нуров Мирмухсин Муродович,

докторант (PhD) кафедры физики Бухарского государственного университета

nurovmirmuhsin1978@gmail.com

Аннотация. Исследованы структурные и морфологические особенности *n*-типа монокристаллического *Cz-Si* после вакуумного нанесения *Cu*, высокотемпературной диффузии при 1573 K в течение 2 ч и последующей закалки. При выбранных температурно-временных параметрах $\theta-2\theta$ XRD фиксирует сохранение кристаллической матрицы *Si* без убедительных признаков выраженной объёмной вторичной фазовой перестройки, тогда как SEM выявляет резко неоднородную и существенно перестроенную приповерхностную область с трещиноватостью и локальным отслаиванием. Точечный EDS не обеспечил количественного подтверждения *Cu* в исследованных зонах, а FTIR дал лишь ограниченную качественную информацию и не позволил провести прямую *Cu*-специфическую химическую идентификацию. В совокупности результаты указывают на устойчивый контраст между сохранённым кристаллическим объёмом и существенно перестроенной приповерхностной областью, формирующийся при совместном действии *Cu*-обработки, высокотемпературного воздействия и закалки; индивидуальные вклады этих факторов в рамках настоящей работы не разделялись. Тем самым стандартная комбинация $\theta-2\theta$ XRD, SEM, точечного EDS и FTIR достаточна для надёжной фиксации такого объёмно-поверхностного состояния, но недостаточна для прямой фазово-химической верификации возможной ультратонкой *Cu*-связанной модификации без привлечения более поверхностно-чувствительных методов.

Ключевые слова: *Cz-Si*; *Cu*-обработка; высокотемпературная диффузия; закалка; приповерхностная область; структурно-морфологическое состояние.

CU BILAN ISHLOV BERILGAN CZ-SI NING YUQORI HARORATLI DIFFUZIYA VA TERMIK TOBLASHDAN KEYINGI HAJMIY HAMDA SIRT STRUKTURAVIY-MORFOLOGIK HOLATI

Annotatsiya. Vakuumdagi *Cu* qatlami yotqizilgan, 1573 K da 2 soat davomida yuqori haroratli diffuziyaga uchirilgan va keyin termik toblangan *n*-tipi monokristalli Choxralski kremniyining (*Cz-Si*) strukturaviy hamda morfologik xususiyatlari tadqiq qilindi. Tanlangan temperatura-vaqt parametrlarida $\theta-2\theta$ XRD tahlili *Si* kristall matritsasining saqlanib qolganini va hajm bo'ylab yaqqol ikkilamchi fazaviy qayta tuzilishning ishonchli belgilari yo'qligini ko'rsatdi, SEM esa yoriqlanish va lokal ajralish bilan tavsiflanadigan keskin notekis hamda sezilarli darajada qayta shakllangan sirtga yaqin sohani aniqladi. Nuqtaviy EDS tahlili tekshirilgan zonalarda *Cu* ni miqdoriy jihatdan tasdiqlamadi, FTIR esa faqat cheklangan sifat ma'lumotini berdi va *Cu*-ga xos kimyoviy identifikatsiyani bevosita amalga oshirish imkonini bermadi. Natijalar majmuasi saqlanib qolgan kristall hajm bilan sezilarli darajada qayta shakllangan sirtga yaqin soha o'rtasidagi barqaror kontrastni ko'rsatadi; bu holat *Cu* bilan ishlov berish, yuqori harorat ta'siri va termik toblashning birgalikdagi ta'siri natijasida shakllangan bo'lib, mazkur ish doirasida ushbu omillarning individual hissalarini alohida ajratib ko'rilmadi. Shunday qilib, $\theta-2\theta$ XRD, SEM, nuqtaviy EDS va FTIRning standart kombinatsiyasi bunday hajmiy-sirt holatini ishonchli qayd etish uchun yetarli, biroq yuzaga yaqin ultrayupqa *Cu*-bog'liq modifikatsiyani to'g'ridan to'g'ri fazaviy-kimyoviy verifikatsiya qilish uchun, sirtga sezgirroq usullarsiz, yetarli emas.

Kalit so'zlar: *Cz-Si*; *Cu* bilan ishlov berish; yuqori haroratli diffuziya; termik toblash; sirtga yaqin soha; strukturaviy-morfologik holat.

STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL STATE OF THE BULK AND SURFACE OF CU-TREATED CZ-SI AFTER HIGH-TEMPERATURE DIFFUSION AND THERMAL TEMPERING

Abstract. *The structural and morphological features of n-type monocrystalline Czochralski-grown silicon (Cz-Si) were investigated after vacuum deposition of Cu, high-temperature diffusion at 1573 K for 2 h, and subsequent thermal tempering. Under the selected temperature–time conditions, θ – 2θ XRD shows preservation of the crystalline Si matrix without convincing evidence of pronounced bulk secondary phase reconstruction, whereas SEM reveals a sharply heterogeneous and substantially restructured near-surface region with cracking and local delamination. Point EDS analysis did not provide quantitative confirmation of Cu in the examined areas, while FTIR yielded only limited qualitative information and did not allow direct Cu-specific chemical identification. Taken together, the results indicate a stable contrast between the preserved crystalline bulk and the substantially restructured near-surface region, formed under the combined action of Cu treatment, high-temperature exposure, and thermal tempering; the individual contributions of these factors were not separated within the framework of the present study. Thus, the standard combination of θ – 2θ XRD, SEM, point EDS, and FTIR is sufficient for reliable detection of such a bulk–surface state, but insufficient for direct phase-chemical verification of a possible ultrathin Cu-related modification without the use of more surface-sensitive methods.*

Keywords: *Cz-Si; Cu treatment; high-temperature diffusion; thermal tempering; near-surface region; structural and morphological state.*

Введение. Медь относится к числу наиболее подвижных металлических примесей в кристаллическом кремнии и способна существенно влиять на дефектную структуру, перераспределение напряжений, электрические свойства и долговременную стабильность материала в условиях высокотемпературной обработки [1–6]. В кремнии, выращенном по методу Чохральского, ситуация дополнительно осложняется присутствием кислорода, который участвует в формировании кислород-связанных дефектов и термодоноров и может влиять на поведение приповерхностной области при экстремальном термическом воздействии [7–13]. В результате после Cu-обработки, высокотемпературной диффузии и последующей закалки объём и поверхность кремния могут изменяться по-разному.

Принципиальная трудность исследования таких систем состоит в том, что используемые методы зондируют разные по глубине области материала и потому несут различную физическую информацию. Обычная симметричная θ – 2θ рентгенодифракция на ориентированном монокристалле Si прежде всего отражает состояние кристаллической матрицы и позволяет судить главным образом о сохранности объёма и наличии достаточно интенсивных объёмных вторичных фаз [14]. Точечный EDS-анализ при сравнительно высокой энергии электронного зонда даёт локальную информацию о составе, но не является оптимально поверхностно-чувствительным методом для ультратонкого модифицированного слоя [15, 16]. Кроме того, Cu-связанные дефектные реакции в кремнии не могут быть надёжно идентифицированы только по косвенным структурным и спектральным признакам [17–19]. FTIR-спектроскопия в Cz-Si преимущественно чувствительна к кислород- и углерод-кислород-связанным конфигурациям и при отсутствии хорошо разрешённых характерных максимумов не может рассматриваться как прямое доказательство Cu-специфической химии [12, 20–25]. Поэтому эти методы следует рассматривать не как взаимозаменяемые средства прямой верификации Cu-связанной приповерхностной фазы, а как взаимодополняющие инструменты, ограничивающие разные аспекты состояния материала после обработки.

В настоящей работе рассматривается структурно-морфологическое состояние объёма и поверхности n-типа Cz-Si, формирующееся после вакуумного нанесения Cu, высокотемпературной диффузии при 1573 K в течение 2 ч и последующей закалки. Цель исследования состоит в том, чтобы определить, какие признаки структурно-морфологического состояния образца надёжно выявляются стандартными лабораторными методами, а какие выводы при таком наборе методов не могут быть прямо подтверждены.

Практическая значимость такой постановки состоит в том, что при выбранном режиме обработки формируется выраженный контраст между сохранённым кристаллическим объёмом и существенно перестроенной приповерхностной областью. Поэтому основной акцент сделан на физически достоверной фиксации этого объёмно-поверхностного состояния и на явном ограничении утверждений, не имеющих прямой экспериментальной опоры.

Материалы и методы.

1. Исходный материал и подготовка образцов. Исходный материал — p-тип монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, с удельным сопротивлением $\rho = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$. Образцы вырезали в виде параллелепипедов размерами $1 \times 7 \times 14 \text{ мм}^3$.

2. Осаждение Cu, высокотемпературная диффузия и закалка. Медь наносили на кремний вакуумным испарением в установке ВУП-4 при остаточном давлении $\sim 10^{-4}$ Торр. Диффузию проводили при 1573 К в течение 2 ч. После диффузионного отжига образцы быстро охлаждали со скоростью $v \approx 200 \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$ (закалка). Основные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные параметры образца Cz-Si и режим высокотемпературной Cu-обработки.

Параметр	Значение
Тип материала	Монокристаллический Cz-Si, p-тип
Удельное сопротивление, ρ	$10 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$
Размер образца	$1 \times 7 \times 14 \text{ мм}^3$
Способ нанесения Cu	Вакуумное испарение, ВУП-4
Остаточное давление	$\sim 10^{-4}$ Торр
Температура диффузии	1573 К
Время диффузии	2 ч
Охлаждение	Закалка, $v \approx 200 \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$

3. Рентгеновская дифракция (XRD). Рентгенодифракционные спектры регистрировали в геометрии θ – 2θ при излучении Cu K α (Rigaku MiniFlex 600). Съёмку проводили в диапазоне $2\theta = 3$ – 90° с шагом 0.01° и скоростью $10^\circ \cdot \text{мин}^{-1}$ (режим трубки: 40 кВ, 15 мА). Выбор симметричной θ – 2θ -геометрии означает, что измерение в первую очередь чувствительно к состоянию монокристаллической матрицы, тогда как для более селективного анализа тонких поверхностных слоёв обычно применяют схемы со скользящим углом падения [26, 27]. В данной работе θ – 2θ XRD использовали как базовый лабораторный метод для оценки того, какие выводы о состоянии образца могут быть надёжно сделаны в данной экспериментальной постановке.

4. ИК-Фурье спектроскопия (FTIR). FTIR-спектры измеряли при комнатной температуре в диапазоне 4000 – 450 см^{-1} . Исходные данные экспортировали как пропускание $T(\nu)$ и переводили в поглощение по формуле $A(\nu) = -\log_{10}[T(\nu)/100]$. Кислород-чувствительный диапазон анализировали после линейного удаления базовой линии. Такая обработка применялась исключительно для качественной оценки слабых особенностей спектра и не использовалась как основание для прямой идентификации Cu-содержащих комплексов. При интерпретации FTIR учитывали, что кислородные полосы в кремнии традиционно используют прежде всего для анализа межузельного кислорода и поведения термодоноров [21–25], а не как прямой маркер меди.

5. SEM и EDS. Морфологию поверхности исследовали на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-IT210 с детектором вторичных электронов (SED) в режиме высокого вакуума. Локальную химическую информацию получали методом EDS. Следует подчеркнуть, что анализ проводили при ускоряющем напряжении 15 кВ, тогда как повышение поверхностной чувствительности в SEM/EDS обычно достигается при существенно более низких ускоряющих напряжениях [28, 29]. Поэтому EDS в настоящей работе рассматривали как локальный ориентировочный метод химического контроля, а не как инструмент окончательной верификации ультратонкой поверхностной модификации.

В исследованном образце локально наблюдаются участки трещиноватости и частичного отделения приповерхностного слоя; поэтому SEM/EDS-анализ выполняли в выбранных зонах с контролируемой морфологией, а результаты интерпретировали как относящиеся именно к обследованным областям. С учётом этого повышенные сигналы С и О рассматривали как локальную характеристику выбранной приповерхностной зоны, на которую могли влиять морфологическая

неоднородность поверхности и присутствие адсорбированных либо загрязняющих компонентов, а не как представительную оценку состава всего объема Si.

6. Обработка данных. Для XRD положения пиков определяли по локальным максимумам в выбранных интервалах 2θ (доминирующие отражения Si). Систематический сдвиг 2θ относительно табличных значений пиков Si трактовали как следствие геометрии установки и высоты образца. Поэтому абсолютные положения максимумов использовали только для качественной индексации доминирующих отражений матрицы Si и не интерпретировали как самостоятельное указание на изменение параметра решетки, упругих напряжений или фазовую перестройку. Для FTIR-спектров в области $900\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ проводили вычитание базовой линии, что позволяло корректно оценивать амплитуды низкоинтенсивных остаточных полос. Условия регистрации SEM задавались в соответствии со значениями, зафиксированными в метаданных исходных файлов. Интерпретацию данных EDS выполняли консервативно ввиду ограниченной глубины зондирования и преобладающего вклада приповерхностных слоёв.

Результаты.

1. Рентгенодифракционный анализ. $\theta\text{--}2\theta$ рентгенодифракционная картина образца Cz-Si после Cu-обработки и закалки определяется прежде всего отражениями кристаллической матрицы кремния. Основной максимум наблюдается при $2\theta \approx 28.89^\circ$, а значительно более слабое высокоугловое отражение — вблизи $2\theta \approx 59.25^\circ$. Такая картина соответствует дифракции ориентированного монокристалла Si в обычной симметричной геометрии, при которой вклад матрицы преобладает в суммарной интенсивности. Наблюдаемые положения максимумов рассматриваются здесь как рабочие экспериментальные значения для индексации доминирующих отражений Si; их абсолютное смещение не использовалось для вывода о параметре решетки, деформационном состоянии или появлении новой фазы. В исследованном диапазоне не выявлен убедительный набор дополнительных отражений, который можно было бы уверенно отнести к объёмным Cu-содержащим вторичным фазам. Следовательно, в пределах чувствительности использованной $\theta\text{--}2\theta$ -геометрии XRD указывает на сохранение кристалличности объёма и не даёт прямой структурной верификации возможного тонкого модифицированного слоя у поверхности.

Результаты рентгенодифракционного анализа приведены на рис. 1 и 2, а параметры доминирующих матричных отражений суммированы в табл. 2.

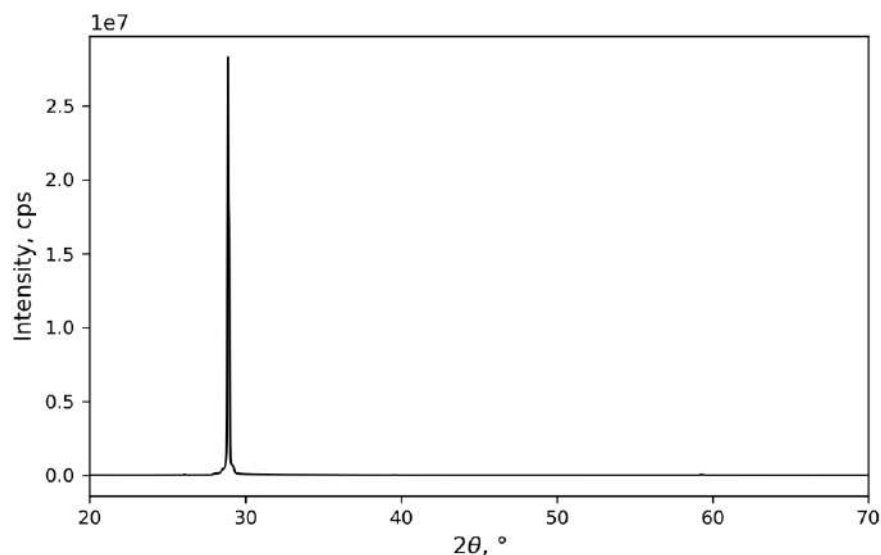


Рис. 1. Рентгенограмма образца Cu/Si после высокотемпературной диффузии и закалки в диапазоне $20\text{--}70^\circ 2\theta$. Показаны доминирующие отражения матрицы Si, определяющие основную дифракционную картину в рабочем диапазоне анализа

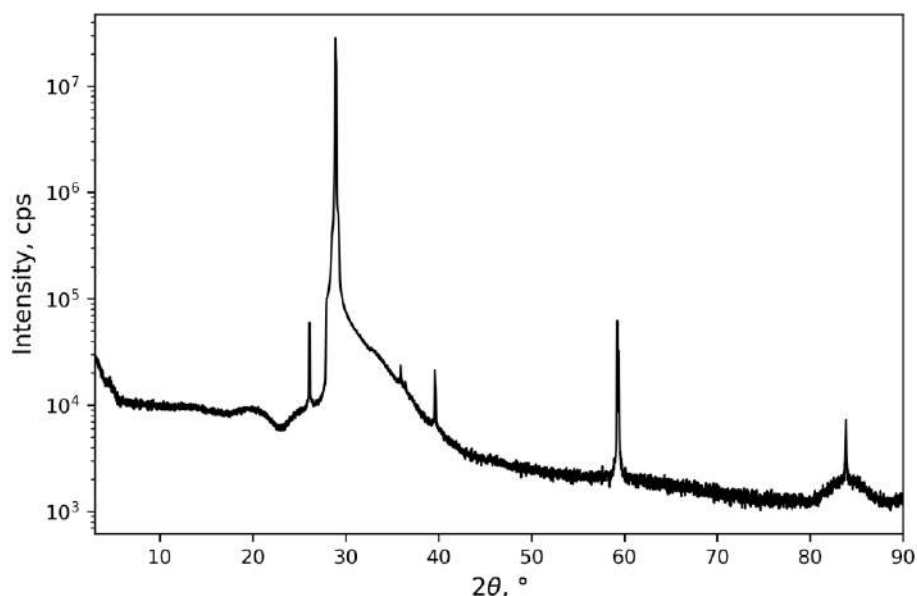


Рис. 2. Обзорная рентгенограмма того же образца в диапазоне 3–90° 2θ в логарифмической шкале интенсивности. Рисунок приведён для контроля полного дифракционного диапазона и оценки наличия возможных слабых дополнительных отражений вне основного рабочего интервала

Таблица 2. Параметры доминирующих отражений матрицы Si.

Отражение	2θ, град	I, cps	I/I(111), %	d, Å	Примечание
Si(111)	28.89	2.83×10^7	100.0	3.09	Доминирующий матричный пик
Si(222)	59.25	6.19×10^4	0.22	1.56	Слабое матричное отражение

Примечание. Положения максимумов приведены как наблюдаемые экспериментальные значения. Их систематическое смещение относительно табличных данных для Si в данной работе не интерпретировалось как признак изменения параметра решётки, деформационного состояния или возникновения новой фазы. Значения межплоскостных расстояний d рассчитаны по наблюдаемым положениям максимумов и приведены справочно.

2. FTIR-спектроскопия. FTIR-спектр, зарегистрированный в диапазоне 4000–450 см^{-1} , не содержит набора интенсивных и хорошо изолированных полос, который позволял бы говорить о формировании спектрально различимого нового приповерхностного слоя или отчётливо выраженной вторичной фазы. Поэтому FTIR-данные в настоящей работе рассматриваются только как вспомогательный качественный источник информации об общем состоянии и химической неоднородности приповерхностной области; они не обеспечивают прямой Si-специфической химической идентификации.

FTIR-спектры в полном диапазоне и после локальной обработки в кислород-чувствительной области представлены на рис. 3 и 4.

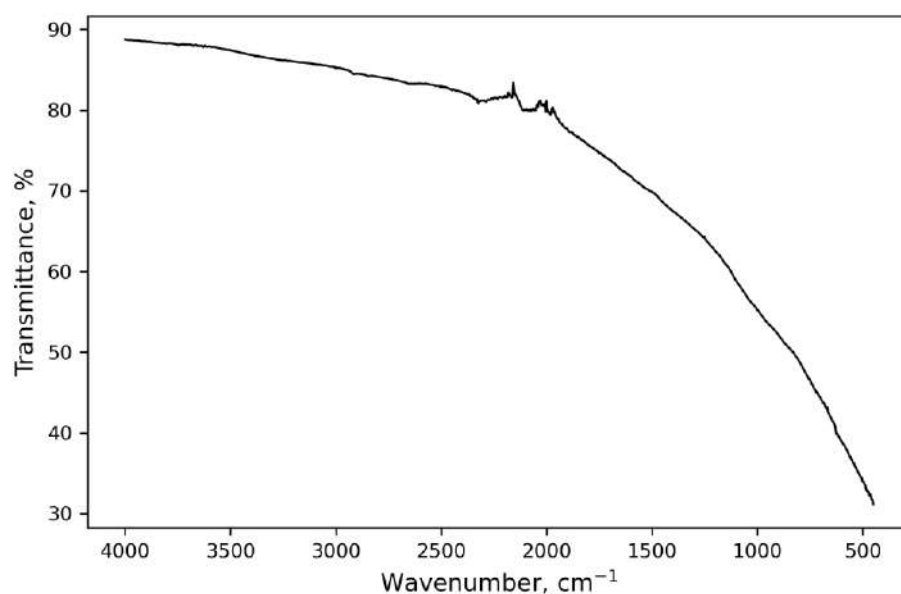


Рис. 3. FTIR-спектр образца после Си-обработки, высокотемпературной диффузии (1573 К, 2 ч) и закалки, диапазон 4000–450 cm^{-1}

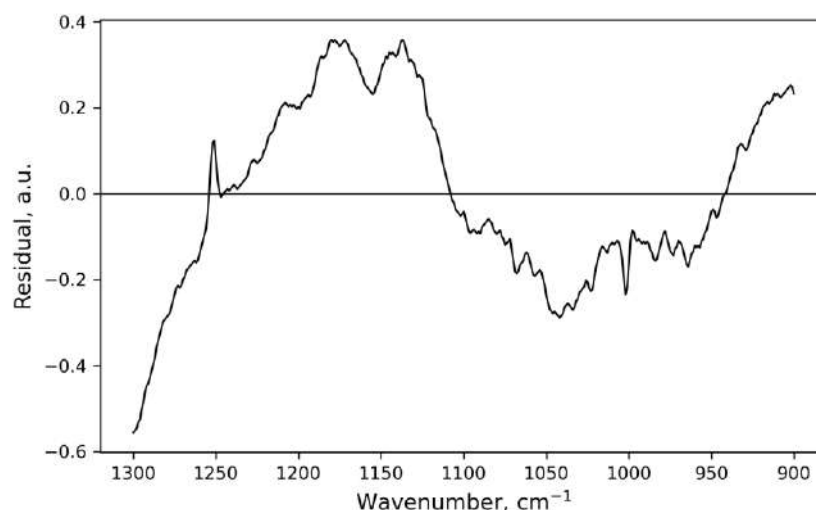


Рис. 4. Остаточный FTIR-сигнал в области 900–1300 cm^{-1} после удаления базовой линии

3. Морфология поверхности по данным SEM. В отличие от рентгенодифракционной картины, определяемой главным образом объёмом, SEM выявляет морфологически неоднородное состояние приповерхностной области: протяжённые трещины, локальные зоны частичного отслаивания, пластинчатые участки и переходы к более сглаженным областям. При больших увеличениях различимы локальные разрывы поверхностного слоя и ступенчатые перепады рельефа; характерные размеры отдельных участков достигают сотен микрометров. Следовательно, наиболее заметные последствия обработки сосредоточены вблизи поверхности. Однако SEM фиксирует морфологию, а не её химическую природу.

4. Локальный химический анализ EDS. Точечный EDS-анализ, выполненный при 15 kV в выбранной области поверхности, не дал количественного подтверждения присутствия Си: в спектре преобладали сигналы С и О, тогда как вклад Si оставался слабым. Такая картина наиболее корректно трактуется как локальная характеристика выбранной приповерхностной зоны, на которую при данном режиме анализа могли существенно влиять морфологическая неоднородность, частичное отделение поверхностного слоя и присутствие адсорбированных либо загрязняющих компонентов. С учётом локального характера измерения и ограниченной поверхностной чувствительности метода при 15 kV полученные EDS-данные не следует рассматривать ни как глобальное отрицательное доказательство отсутствия Си во всём образце, ни как прямое подтверждение Си-специфической приповерхностной фазы.

Морфология поверхности и результаты локального химического анализа по выбранной области показаны на рис. 5 и 6; условия SEM-съёмки приведены в табл. 3, а результаты точечного EDS-анализа — в табл. 4.

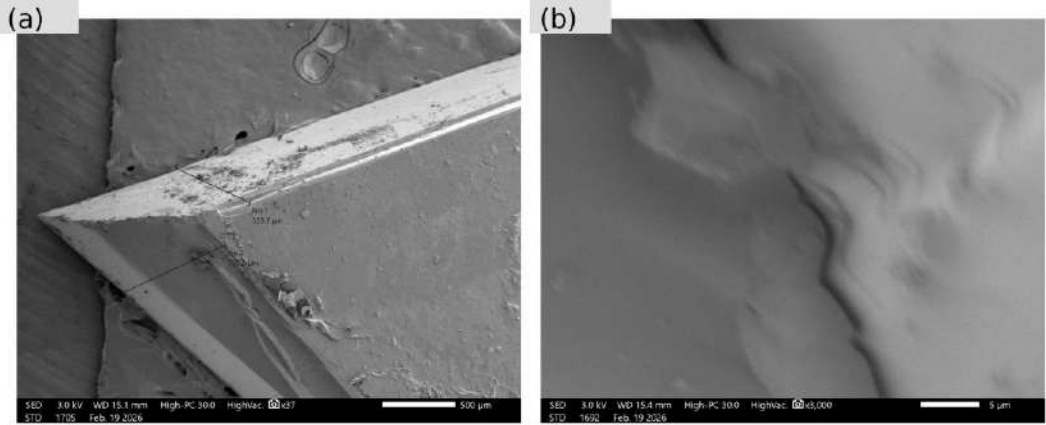


Рис. 5. SEM-изображения поверхности после Cu-обработки, высокотемпературной диффузии (1573 К, 2 ч) и закалки: (а) обзорный участок с сетью трещин и зонами локального отслаивания; (b) увеличенный участок с развитым рельефом

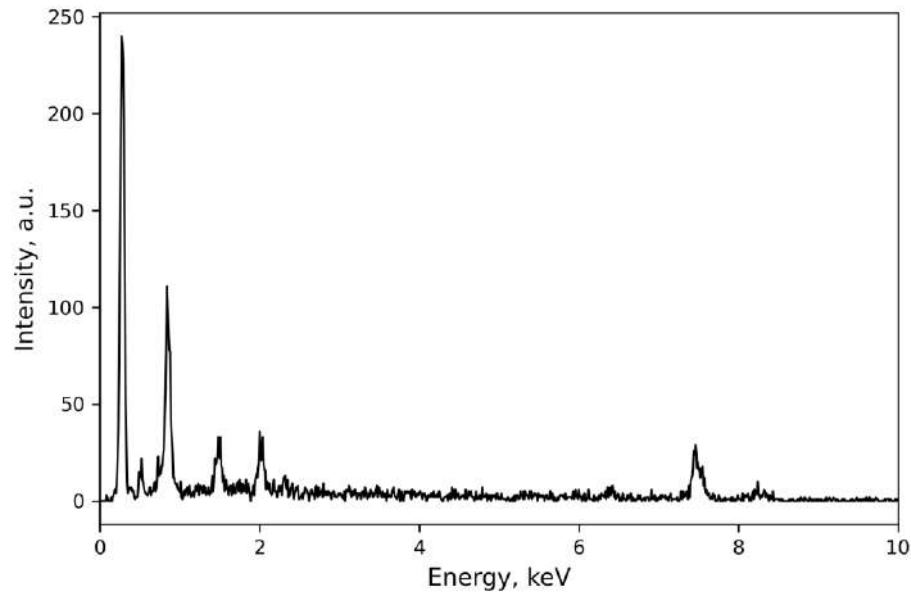


Рис. 6. EDS-спектр, зарегистрированный в выбранной области поверхности после Cu-обработки, высокотемпературной диффузии (1573 К, 2 ч) и закалки

Таблица 3. Условия SEM-съёмки для изображений на рис. 5.

Изображение	Увеличение	Ускоряющее напряжение, kV	WD, мм	Детектор	Режим вакуума	Поле зрения	Масштабная линейка
Рис. 5а	×37	3	15.1	SED	Высокий вакуум	3.46 мм × 2.60 мм	500 мкм
Рис. 5b	×3000	3	15.4	SED	Высокий вакуум	42.7 мкм × 32.0 мкм	5 мкм

Таблица 4. Результаты точечного EDS-анализа в выбранной области поверхности.

Элемент	Массовая доля, %	Атомная доля, %	Комментарий
---------	------------------	-----------------	-------------

Элемент	Массовая доля, %	Атомная доля, %	Комментарий
C	84.4 ± 1.9	87.9 ± 2.0	Доминирующий вклад в выбранной точке
O	15.4 ± 2.6	12.0 ± 2.0	Значимый приповерхностный сигнал
Si	0.3 ± 0.3	0.1 ± 0.1	Слабый сигнал матрицы
Cu	nd	nd	Не обнаружен в выбранной области

Примечание. Доминирующие сигналы C и O относятся к выбранной приповерхностной области и не интерпретируются как характеристика состава всего объёма Si. Их вклад мог усиливаться морфологической неоднородностью поверхности, частичным отделением приповерхностного слоя и присутствием адсорбированных либо загрязняющих компонентов.

1. Обсуждение.

1. Структурное состояние объёма. Рентгенодифракционные данные показывают, что при выбранном режиме обработки структурный ответ образца в используемой θ – 2θ -геометрии определяется прежде всего кристаллической матрицей Si. Это указывает на сохранение кристалличности объёма и отсутствие достаточно интенсивной объёмной вторичной фазы в пределах чувствительности метода. Вместе с тем такой вывод не может быть автоматически распространён на ультратонкую приповерхностную область, вклад которой экранируется сигналом подложки.

2. Перестройка поверхности. SEM, напротив, показывает, что при данном сочетании условий обработки приповерхностная область реагирует значительно сильнее, чем объём. Трещиноватость, локальные зоны отслаивания и пространственная неоднородность указывают на концентрацию наиболее заметных последствий обработки вблизи поверхности. Такая картина качественно согласуется с развитием термомеханических напряжений и растрескиванием кремния при жёстком тепловом цикле [30], однако без контрольного образца без Cu этот эффект нельзя отделить от возможного вклада Cu-обработки. Локальная химическая информация при этом остаётся ограниченной: точечный EDS при 15 kV не дал количественного подтверждения Cu в исследованной области, а FTIR предоставил лишь качественные данные без прямой Cu-специфической идентификации. Следовательно, текущий набор данных надёжно фиксирует морфологическую перестройку приповерхностной области, но не позволяет однозначно установить её химическую природу.

3. Интерпретация и методические ограничения. Наиболее обоснованная интерпретация состоит в том, что при выбранном режиме обработки формируется выраженный контраст между кристаллическим объёмом и приповерхностной областью: объём сохраняет кристалличность в пределах чувствительности θ – 2θ XRD, тогда как приповерхностная зона переходит в морфологически и структурно неоднородное состояние. Работа не даёт прямого доказательства Cu-специфической приповерхностной фазы: XRD не выявляет убедительной объёмной Cu-содержащей фазы, точечный EDS не подтверждает Cu количественно в исследованной области, FTIR имеет ограниченную химическую избирательность, а контроль без Cu не выполнялся. Поэтому наблюдаемую картину следует рассматривать как совокупный результат Cu-обработки, высокотемпературного воздействия и закалки; индивидуальные вклады этих факторов не разделены.

В практическом отношении эти результаты задают границы достоверной интерпретации стандартно доступных лабораторных методов: они позволяют надёжно фиксировать контраст между сохранённым кристаллическим объёмом и существенно перестроенной приповерхностной областью, но сами по себе не обеспечивают прямой фазово-химической идентификации возможной ультратонкой Cu-связанной модификации.

2. Заключение. Установлено, что после вакуумного нанесения Si, высокотемпературной диффузии при 1573 К в течение 2 ч и последующей закалки в n-типа Cz-Si формируется выраженный контраст между кристаллическим объёмом и приповерхностной областью. В пределах чувствительности θ – 2θ XRD объём сохраняет кристалличность, тогда как SEM выявляет морфологически неоднородную приповерхностную область с трещинами и локальными участками отслаивания. Точечный EDS не подтвердил Si количественно в исследованной области, а FTIR дал лишь ограниченную качественную информацию.

Таким образом, наблюдаемое объёмно-поверхностное состояние следует рассматривать как совокупный результат Si-обработки, высокотемпературного воздействия и закалки; индивидуальные вклады этих факторов в данной работе не разделялись. Применённая комбинация θ – 2θ XRD, SEM, точечного EDS и FTIR достаточна для надёжной фиксации этого контраста и задания границ корректной интерпретации, но недостаточна для прямой фазово-химической верификации возможной ультратонкой Si-связанной модификации без привлечения более поверхностно-чувствительных методов.

ЛИТЕРАТУРЫ:

1. A. Gaspar. Copper-related light-induced degradation in compensated p-type and n-type Czochralski silicon solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 248, 112024 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112024>.
2. A. Liu, S. P. Phang, D. Macdonald. Surface metal contamination on silicon solar cells: Insights from light-induced degradation kinetics. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 244, 111836 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111836>.
3. J. Yu. Copper metallization of electrodes for silicon heterojunction solar cells: process, reliability and challenges. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 224, 110993 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.110993>.
4. N. Yarykin, J. Weber. Copper-rich complexes in irradiated silicon. *J. Appl. Phys.* 136, 125701 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0232388>.
5. P. Chen, Y. Li, F. Qin, T. An, Y. Dai, M. Zhang, M. Liu, L. Zhang. First-principles study of copper contamination in silicon semiconductor. *Surfaces and Interfaces* 31, 102084 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102084>.
6. A. N. Danilewsky, K. Hanke, S. S. Schumacher, K. M. Wietzke. Silicon crystal fracture: the role of dislocations, impurities and internal defects. *J. Appl. Phys.* 132, 035702 (2022). <https://doi.org/10.1063/5.0104573>.
7. T. Le, Y. Cai, Z. Yang, R. Chen, D. Macdonald, A. Y. Liu. Industrial Czochralski n-type Silicon Wafers: Gettering Effectiveness and Possible Bulk Limiting Defects. *Solar RRL* 8, 2300928 (2024). <https://doi.org/10.1002/solr.202300928>.
8. S. Maus, S. Mack, J. Schön, M. Meßmer, A. Wolf, O. Paul. Comprehensive Model for Charge Carrier Recombination in Czochralski-Grown Silicon Due to Oxygen Precipitation in Industrial Solar Cell Manufacturing. *Solar RRL* 7, 2200980 (2023). <https://doi.org/10.1002/solr.202200980>.
9. B. Basnet, D. Macdonald, A. Stokes, A. G. Aberle, Z. Hameiri. Ring-like defects related to thermal donor formation during CZ silicon crystal growth. *Phys. Status Solidi A* 218, 2000559 (2021). <https://doi.org/10.1002/pssa.202000559>.
10. E. Olsen. Effect of pull speed and heat treatment on thermal donors and boron-oxygen defects in p-type Czochralski silicon. *Phys. Status Solidi A* 219, 2200176 (2022). <https://doi.org/10.1002/pssa.202200176>.
11. D. Choi. Electrical properties of new oxygen-related defects in Czochralski silicon. *Solid-State Electronics* 171, 105984 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.sse.2020.105984>.
12. M. S. Potsidi, N. Kuganathan, S.-R. G. Christopoulos, A. Chroneos, T. Angeletos, N. V. Sarlis, C. A. Londos. The Interstitial Carbon–Dioxygen Center in Irradiated Silicon. *Crystals* 10, 1005 (2020). <https://doi.org/10.3390/cryst10111005>.
13. M. U. Kalanov, I. I. Sadikov, A. V. Khugaev, Sh. R. Malikov, A. S. Saidov, Sh. N. Usmonov, D. V. Saparov. Thermally Stimulated Transformation of Oxygen Atoms Between Phase States in a Silicon Single Crystal. *Silicon* 16, 4091–4097 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02985-y>.
14. G. F. Harrington, J. Santiso. Back-to-basics tutorial: X-ray diffraction of thin films. *J. Electroceramics* 47, 281–288 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10832-021-00263-6>.

15. N. W. M. Ritchie, A. L. Herzing, V. P. Oleshko. Quantification of Unsupported Thin-Film X-ray Spectra Using Bulk Standards. *Microsc. Microanal.* 29, 1921–1930 (2023). <https://doi.org/10.1093/micmic/ozad109>.
16. T. Walther. Recent improvements in quantification of energy-dispersive X-ray spectra and maps in electron microscopy of semiconductors. *Applied Research* 3, e202300128 (2024). <https://doi.org/10.1002/appl.202300128>.
17. S. Knack. Copper-related defects in silicon. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 7(3), 125–141 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2004.06.002>.
18. A. Mesli, T. Heiser. Defect reactions in copper-diffused and quenched p-type silicon. *Phys. Rev. B* 45(20), 11632–11641 (1992). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.45.11632>.
19. T. Heiser, A.A. Istratov, C. Flink, E.R. Weber. Electrical characterization of copper related defect reactions in silicon. *Mater. Sci. Eng. B* 58(1–2), 149–154 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(98\)00287-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(98)00287-6).
20. H. Wendt, H. Cerva, V. Lehmann, W. Pamler. Impact of copper contamination on the quality of silicon oxides. *J. Appl. Phys.* 65(6), 2402–2405 (1989). <https://doi.org/10.1063/1.342808>.
21. W. Kaiser, P.H. Keck, C.F. Lange. Infrared Absorption and Oxygen Content in Silicon and Germanium. *Phys. Rev.* 101, 1264–1268 (1956). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.101.1264>.
22. H.J. Hrostowski, R.H. Kaiser. Infrared Absorption of Oxygen in Silicon. *Phys. Rev.* 107, 966–972 (1957). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.107.966>.
23. G. Stingeder, S. Gara, S. Pahlke, M. Grasserbauer. Quantitative determination of oxygen in silicon by combination of FTIR-spectroscopy, inert gas fusion analysis and secondary ion mass spectroscopy. *Z. Anal. Chem.* 333, 576–582 (1989). <https://doi.org/10.1007/BF00572379>.
24. C.S. Chen, F.Q. Zeng, Y.X. Huang et al. Thermal configurations of oxygen in silicon. *Appl. Phys. A* 55, 317–323 (1992). <https://doi.org/10.1007/BF00324078>.
25. K. Yasutake, M. Umeno, H. Kawabe. Oxygen precipitation and microdefects in Czochralski-grown silicon crystals. *Phys. Status Solidi A* 83(1), 207–217 (1984). <https://doi.org/10.1002/pssa.2210830122>.
26. D. Simeone, G. Baldinozzi, D. Gosset, S. Le Caer, J.-F. Bérar. Grazing incidence X-ray diffraction for the study of polycrystalline layers. *Thin Solid Films* 530, 9–13 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.07.068>.
27. G. Lim, W. Parrish, C. Ortiz, M. Bellotto, M. Hart. Grazing incidence synchrotron x-ray diffraction method for analyzing thin films. *J. Mater. Res.* 2, 471–477 (1987). <https://doi.org/10.1557/JMR.1987.0471>.
28. S. Burgess, J. Sagar, J. Holland, X. Li, F. Bauer. Ultra-Low kV EDS – A New Approach to Improved Spatial Resolution, Surface Sensitivity, and Light Element Compositional Imaging and Analysis in the SEM. *Microscopy Today* 25(2), 20–29 (2017). <https://doi.org/10.1017/S1551929517000013>.
29. J.F. Nohl, N.T.H. Farr, Y. Sun, G.M. Hughes, S.A. Cussen, C. Rodenburg. Low-voltage SEM of air-sensitive powders: From sample preparation to micro/nano analysis with secondary electron hyperspectral imaging. *Micron* 156, 103234 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103234>.
30. A. Danilewsky, J. Wittge, K. Kiefl, D. Allen, P. McNally, J. Garagorri, M.R. Elizalde, T. Baumbach, B.K. Tanner. Crack propagation and fracture in silicon wafers under thermal stress. *J. Appl. Crystallogr.* 46(4), 849–855 (2013). <https://doi.org/10.1107/S0021889813003695>.

Заявления

Доступность данных. Исходные и обработанные XRD-, FTIR-, SEM- и EDS-данные, подтверждающие результаты настоящей работы, могут быть предоставлены автором для переписки по обоснованному запросу.

Вклад авторов. С.О. Саидов разработал концепцию исследования, выполнил анализ данных, интерпретацию результатов и подготовку рукописи. М.М. Нуров внёс вклад в постановку эксперимента, обсуждение результатов и редактирование текста.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Специальное внешнее финансирование для выполнения данной работы не заявлялось.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КУБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ ТИПА NaCl ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Ахмеджанов Фархад Рашидович,
заведующий лабораторией "Теплофизика многофазных систем"
Института ионно-плазменных и
лазерных технологий АН РУз
Нуждов Георгий Сергеевич,
старший научный сотрудник
"Теплофизика многофазных систем"
Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз
nujdov_g@mail.ru

Аннотация. В работе исследована анизотропия затухания акустических волн в кристаллах со структурой NaCl. Для анализа применен численный метод, основанный на решении уравнения Кристоффеля с использованием комплексных упругих констант. Исследованы кристаллы NaCl, NaBr и KBr. На основе действительных и мнимых компонентов тензора упругости рассчитаны действительные и мнимые эффективные упругие постоянные для различных направлений распространения волн. Определены пространственные зависимости коэффициента затухания для различных мод акустических волн.

Ключевые слова: акустические волны, затухание, кубические кристаллы, анизотропия упругих свойств, уравнения Кристоффеля, комплексные упругие константы.

AKUSTIK TO‘LQINLARNING SO‘NISH ANIZOTROPIYASINI TEKSHIRISH NaCl TIPIDAGI KUBIK KRISTALLARDA SONLI USULDA

Annotatsiya. Ushbu ishda NaCl tipdagi tuzilishli kristallarda akustik to‘lqinlarning so‘nish anizotropiyasi o‘rganilgan. Tahlil uchun kompleks elastik doimiylar yordamida Kristoffel tenglamasini yechishga asoslangan sonli usul qo‘llanilgan. NaCl, NaBr va KBr kristallari tadqiqot qilingan. Elastiklik tenzorining haqiqiy va mavhum komponentalari asosida to‘lqin tarqalishining turli yo‘nalishlari uchun haqiqiy va mavhum effektiv elastik doimiylar hisoblangan. Akustik to‘lqinlarning turli modalari uchun so‘nish koeffitsiyentining fazoviy bog‘lanishlari aniqlandi.

Kalit so‘zlar: akustik to‘lqinlar, so‘nish, kubik kristallar, elastik xossalar anizotropiyasi, Kristoffel tenglamalari, kompleks elastik konstantalar.

INVESTIGATION OF ACOUSTIC WAVE ATTENUATION ANISOTROPY IN CUBIC CRYSTALS OF NaCl TYPE BY NUMERICAL METHODS

Abstract. In this work, the anisotropy of the attenuation of acoustic waves in crystals with the NaCl structure was studied. A numerical method based on solving the Christoffel equation using complex elastic constants was used for the analysis. Crystals of NaCl, NaBr and KBr were investigated. Based on the real and imaginary components of the elasticity tensor, real and imaginary effective elastic constants are calculated for various directions of wave propagation. The spatial dependences of the attenuation coefficient for various modes of acoustic waves were determined.

Key words: acoustic waves, attenuation, cubic crystals, anisotropy of elastic properties, Christoffel equations, complex elastic constants.

Введение. Кубические кристаллы типа NaCl характеризуются высокой химической стабильностью, оптической прозрачностью и значительной температурой плавления [1]. Существенный интерес к данным материалам обусловлен их акустическими и акустооптическими свойствами, находящими применение как в классической ультразвуковой технике [2], так и в современных устройствах терагерцовой фотоники и акустоэлектроники [3, 4]. Вместе с тем кристаллы с высокими акустооптическими параметрами, как правило, обладают значительным

коэффициентом акустического затухания [1–4], что ограничивает их применение в области высоких частот.

Несмотря на относительную простоту симметрии кубических кристаллов, анизотропия их акустических характеристик, в частности коэффициента затухания, остаётся недостаточно изученной во всём угловом пространстве. Экспериментальное определение этого параметра сопряжено с рядом технических трудностей, что, как правило, не позволяет установить его для всех направлений распространения акустической волны в кристалле. Вместе с тем анализ пространственного распределения коэффициента затухания, отражающего его зависимость от направления распространения и поляризации волны, имеет важное значение для практических применений.

В работах [5,6] были проведены экспериментально-аналитические исследования затухания акустических волн в кубических кристаллах, и показано, что затухание может быть найдено из соотношений действительной и мнимой эффективных упругих постоянных. В настоящей работе рассматривается метод на основе численного моделирования, который позволяет находить эффективные упругие постоянные комплексного характера. Такой подход дает возможность вычислять пространственное распределение коэффициента затухания продольных, быстрых поперечных и медленных поперечных акустических волн в кристаллах NaCl, NaBr и KBr.

Методика расчета. Феноменологически скорость распространения и затухание акустических волн могут быть описаны через действительную и мнимую части тензора упругих констант c_{ijkl} . Для кристаллов кубической симметрии достаточно задания трех независимых компонентов действительной и мнимой частей тензора упругости (c_{11} , c_{12} , c_{44}). В расчётах использовались численные значения действительных и мнимых эффективных упругих постоянных, приведённых в таблице 1 [5,6].

Таблица 1.

Эффективные упругие константы кристаллах KBr, NaBr и NaCl.

q	η	$c'_{\text{eff}}, 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$			$c''_{\text{eff}}, 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$		
		KBr	NaBr	NaCl	KBr	NaBr	NaCl
[100]	[100]	3.45	3.87	4.85	4.82	3.70	3.20
	[001]	0.51	0.97	1.30	0.11	0.11	0.09
[110]	[110]	2.5	3.39	4.41	2.81	2.01	1.62
	[110]	1.46	1.45	1.84	2.12	1.79	1.69
	[001]	0.51	0.97	1.30	0.11	0.11	0.09
[111]	[111]	2.19	3.23	4.20	2.14	1.45	1.16
	[110]	1.14	1.29	1.67	1.45	1.23	1.05

Распространение акустических волн в анизотропной среде описывается уравнением [1]

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (c'_{ijkl} + i c''_{ijkl}) \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} \quad (1)$$

где u_i — компоненты вектора смещения, ρ — плотность, c_{ijkl} — компоненты комплексного тензора упругости.

Для решения уравнения (1) обычно используется приближение плоской гармонической волны:

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = A \vec{\gamma} \exp[i(\vec{q} \vec{r} - \omega t)], \quad (2)$$

где A — амплитуда волны, $\vec{\gamma}$ — единичный вектор поляризации, $\vec{q} = 2\pi \vec{k} / \lambda$ — волновой вектор волны, $\vec{k}$ — единичный вектор волновой нормали, ω — круговая частота акустических волн.

Подстановка (2) в (1) приводит к системе уравнений Грина-Кристоффеля, которая для действительной части в компактной форме записывается в виде [5]:

$$(\Gamma_{ik} - \rho V^2 \delta_{ik}) \gamma_k = 0, \quad (3)$$

где V — скорость акустической волны, δ_{ik} — единичный тензор Кронекера, γ_k — компоненты вектора поляризации. Компоненты тензора Грина-Кристоффеля Γ_{ik} определяются из выражения [5]:

$$\Gamma_{ik} = c_{ijkl} \kappa_j \kappa_l, \quad (4)$$

где κ_i представляют собой направляющие косинусы волнового вектора акустических волн в рассматриваемой плоскости.

Для нахождения действительных компонентов тензора Грина-Кристоффеля Γ'_{ik} в выражения (4) надо подставить действительные компоненты упругих констант c'_{ijkl} , а для нахождения мнимых компонентов тензора Грина-Кристоффеля Γ''_{ik} необходимо использовать мнимые компоненты упругих констант c''_{ijkl} .

Как известно, система уравнений (3) имеет нетривиальные решения в том случае, когда определитель системы равен нулю. Для нахождения действительной c'_{eff} или мнимой c''_{eff} эффективной упругой постоянной в этот определитель также надо подставить либо действительные Γ'_{ik} либо мнимые Γ''_{ik} компоненты тензора Грина-Кристоффеля.

Для численной реализации описанной модели был разработан программный комплекс на языке **Python**. Вычислительное ядро программы опирается на библиотеку **NumPy**, что позволило эффективно реализовать тензорные операции и матричные умножения при нахождении эффективных упругих модулей. Таким образом, можно отойти от решения детерминантного уравнения в пользу прямого вычисления эффективных упругих постоянных c_{eff} для любого направления. В программном коде это реализовано через формирование ортонормированного базиса (n, e_1, e_2) для каждого направления сферических углов φ и θ . Эффективный модуль для конкретной моды (продольной или поперечной) вычисляется как квадратичная форма [1]:

$$c_{eff} = \sum_{i,j,k,l} c_{ijkl} n_i n_j n_k n_l \quad (5)$$

Это соответствует свертке вектора деформации, порожденного заданным направлением и поляризацией, с матрицей упругости в нотации Фойгта.

Вместе с тем использование эффективных упругих постоянных позволяет определить коэффициент затухания акустической волны вдоль заданного направления через выражение [5]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{c''_{eff}}{c'_{eff}} \omega. \quad (6)$$

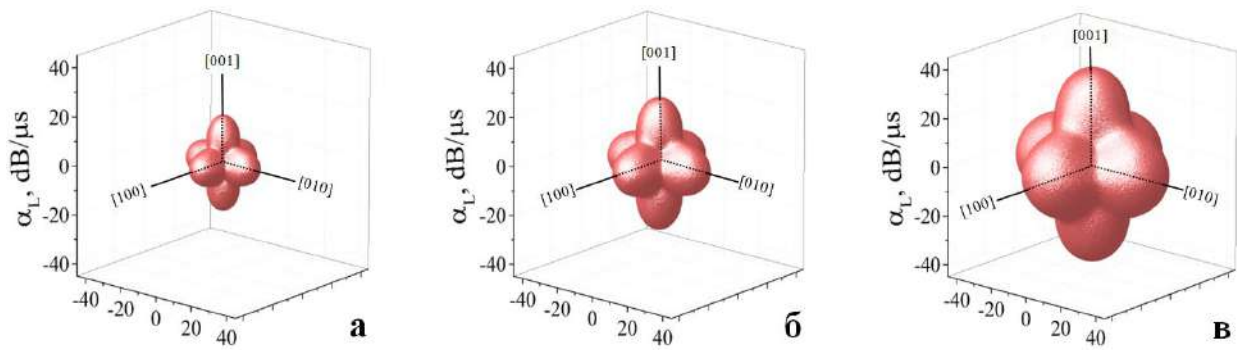
Отметим, что выражение (6) справедливо, если основным механизмом затухания акустических волн является фонон-фононный механизм Ахиезера [5].

Расчёты проводились путём сканирования всех направлений распространения акустической волны с использованием сферических углов φ и θ . Для каждого направления определялись эффективные упругие постоянные и коэффициенты затухания для продольных (L), быстрых поперечных (S_1) и медленных поперечных (S_2) мод акустических волн, что позволило построить их пространственные распределения.

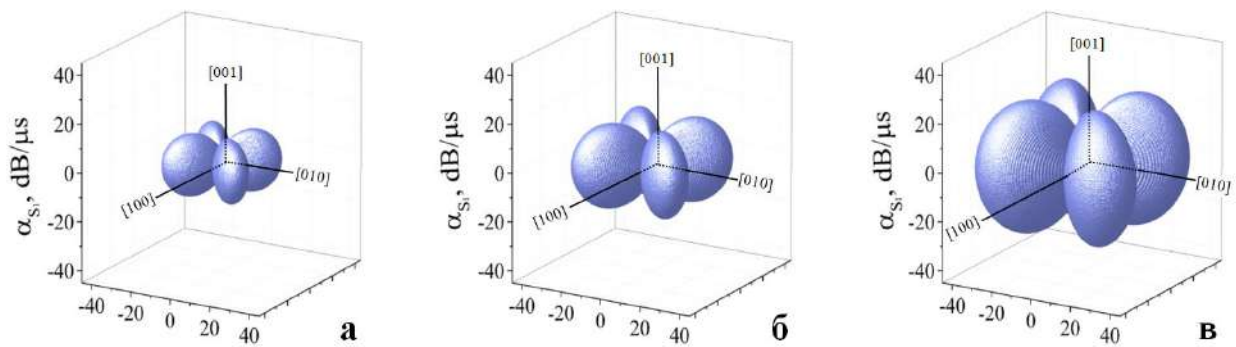
Результаты расчетов. На основе разработанного алгоритма были рассчитаны пространственное распределение затухания акустических волн для кристаллов NaCl, NaBr и KBr. В качестве исходных данных были использованы действительные и мнимые компоненты тензора упругости для соответствующих типов кристаллов [5,6]. Вычисление коэффициента затухания проводилось по формуле 6 на частоте звука 1 ГГц.

Расчёты показали, что наблюдается заметная анизотропия затухания акустических волн, что согласуется с теоретическими представлениями об упругой анизотропии кристаллов [1-4].

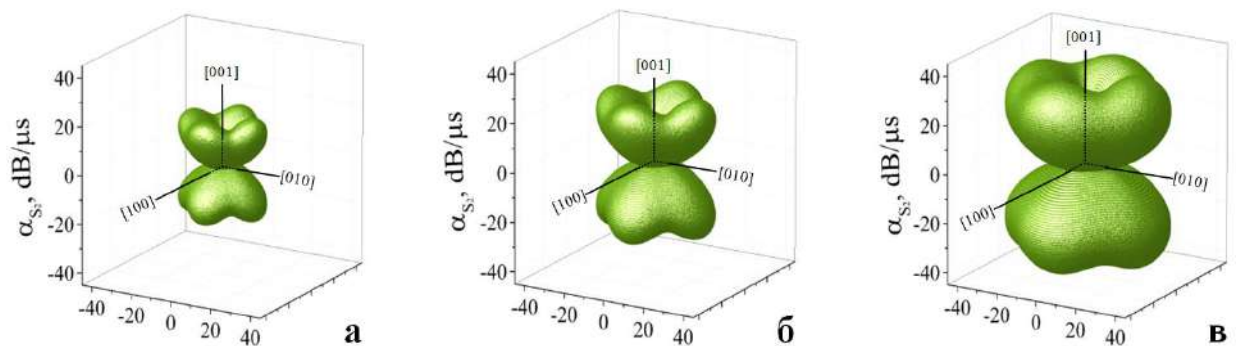
Максимальные значения затухания продольных мод наблюдаются вблизи направлений [100], [010] и [001], тогда как минимальные значения соответствуют направлениям, близким к [111]. Для быстрых и медленных поперечных мод анизотропия выражена значительно сильнее. Поверхности затухания поперечных мод имеют более сложную форму и существенно зависят от направления распространения и поляризации волны. В случае быстрых поперечных S_1 мод максимальное затухание явно наблюдается в направлении [110]. При этом минимальное затухание не показывает выраженного характера и по форме представляет собой две квазиокружности, принадлежащие плоскостям XZ и YZ. В случае медленных поперечных S_2 мод максимальное затухание явно наблюдается в направлении [101] и [011]. Минимальное затухание лежит в плоскости XY.



1-Рис. Пространственное распределение затухания продольной моды L акустической волны в кристаллах NaCl (а), NaBr (б) и KBr (в)



2-Рис. Пространственное распределение затухания поперечной моды S₁ акустической волны в кристаллах NaCl (а), NaBr (б) и KBr (в)



3-Рис. Пространственное распределение затухания поперечной моды S₂ акустической волны в кристаллах NaCl (а), NaBr (б) и KBr (в)

Обсуждение результатов. Построенные трёхмерные поверхности акустического затухания позволяют наглядно представить пространственную анизотропию упругих свойств исследуемых кристаллов.

Полученные результаты согласуются с известными теоретическими моделями распространения упругих волн в анизотропных средах [1-4]. При этом наблюдается существенное различие между поверхностями затухания продольных и поперечных мод. Сравнение с экспериментальными данными [5,6] показывает качественное согласие между экспериментальными и расчётными результатами.

Заключение. На основе решения уравнения Кристоффеля с использованием комплексных упругих модулей разработан и реализован на языке Python алгоритм прямого вычисления эффективных упругих постоянных для произвольных направлений распространения волн. В рамках данной модели построены полные трехмерные поверхности коэффициента затухания для продольных (L), быстрых (S₁) и медленных (S₂) поперечных акустических мод на частоте 1 ГГц. Установлено, что

в исследуемых кристаллах наблюдается существенная анизотропия поглощения звука. Наиболее сложный характер пространственного распределения затухания характерен для поперечных мод, где максимумы локализованы вдоль направлений [110], [101] и [011]. Показано качественное согласие полученных расчетных данных с имеющимися экспериментальными результатами, что подтверждает адекватность выбранного феноменологического подхода и возможность его применения для прогнозирования акустических свойств кубических кристаллов.

Полученные результаты наиболее полно описывают пространственную структуру акустических свойств кристаллов и могут быть использованы при разработке акустооптических и ультразвуковых устройств.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Benjamin A. Auld. *Acoustic Fields and Waves in Solids*. Vol. 1–2. New York: John Wiley & Sons, 1973.
2. Jafarzadeh H., Folkow P.D., Bodstrom A. Scattering of elastic waves by a sphere with cubic anisotropy: an analytical and numerical study // *Proceedings of the Royal Society A*. — 2023. — Vol. 479. — № 2272. — <https://doi.org/10.1098/rspa.2022.0476>
3. Lee, K.S., Ko, J.H. Elastic anisotropy and slowness curves in cubic crystals: $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ and $Bi_{12}SiO_{20}$. // *J. Korean Phys. Soc.* — 2026 — Vol. 88, P. 787–798. <https://doi.org/10.1007/s40042-025-01562-9>
4. Балакиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. *Физические основы акустооптики*. — М.: Радио и связь, 1985. — 280 с.
5. Ахмеджанов Ф.Р., Курбанов Ж.О., Махаров Н.М., Авдиевич В.Н. Затухание высокочастотных акустических волн в кристаллах хлорида натрия // *Узбекский Физический Журнал*.- 2023. — Vol. 25. — No. 4. — P. 68-71. DOI: <https://doi.org/10.52304/v25i4.478>
6. Ахмеджанов Ф.Р., Махаров Н.М. Затухание акустических волн и константа Грюнайзена в кубических кристаллах // *Узбекский Физический Журнал*.- 2023. — Vol. 27. — No. 1. — P. 78-82. DOI: [10.52304/v27i1.601](https://doi.org/10.52304/v27i1.601)

O'TKINCHI METALL AMORF QOTISHMALARIDA TERMOELEKTRIK YURITUVCHI KUCHNING TEMPERATURAGA BOG'LIQLIGI

Erdosheva Guljahon Orif qizi,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti,

Muhandislik fizikasi instituti 1-bosqich talabasi

erdashevaguljahon@gmail.com

Annottatsiya. Ushbu maqolada amorf o'tkinchi metall qotishmalarida termoelektrik yurituvchi kuchning temperaturaga bog'liqligi keng tahlil qilinadi. Amorf tuzilmaning kristall tuzilmalardan farqi, elektronlarning sochilishi, fononlarning ta'siri va energiya holatlari zichligining o'zgarishi asosida termoelektrik javobning fizik sabablari izohlanadi. Past va yuqori temperaturada kuzatiladigan xususiyatlar taqqoslanib, Zeebek koeffitsiyentining o'zgarishi va uning murakkab mexanizmlari ko'rsatib beriladi. Tadqiqot amorf o'tkinchi metall qotishmalarining termoelektrik xossalarini chuqurroq anglashga yordam beradi.

Kalit so'zlar: amorf qotishmalar, o'tkinchi metall, termoelektrik yurituvchi kuch, zeebek effekti, elektron sochilishi, fononlar, temperaturaga bog'liqlik.

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Аннотация. В статье подробно анализируется зависимость термоэлектрической движущей силы от температуры в аморфных сплавах переходных металлов. Рассматриваются различия аморфной и кристаллической структуры, влияние рассеяния электронов, фононов и изменения плотности энергетических состояний на термоэлектрический отклик. Сравниваются особенности при низких и высоких температурах, показывается изменение коэффициента Зеебека и сложные механизмы его формирования. Исследование способствует более глубокому пониманию термоэлектрических свойств аморфных сплавов переходных металлов.

Ключевые слова: Аморфные сплавы, переходные металлы, термоэлектрическая движущая сила, эффект зеебека, рассеяние электронов, фононы, зависимость от температуры.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE THERMOELECTRIC ELECTROMOTIVE FORCE IN AMORPHOUS ALLOYS OF TRANSITION METALS

Abstract. The article provides a detailed analysis of the temperature dependence of the thermoelectric driving force in amorphous transition metal alloys. It examines the differences between amorphous and crystalline structures, the role of electron scattering, phonon interactions, and changes in the density of electronic states in shaping the thermoelectric response. The study compares behaviors at low and high temperatures, highlighting variations in the Seebeck coefficient and the complex mechanisms behind it. The findings contribute to a deeper understanding of the thermoelectric properties of amorphous transition metal alloys.

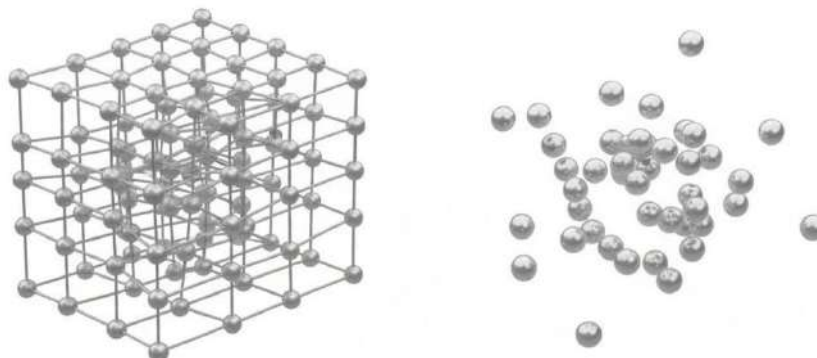
Keywords: Amorphous alloys, transition metals, thermoelectric driving force, seebeck effect, electron scattering, phonons, temperature dependence.

Kirish. Termoelektrik hodisalar materiallarning issiqlik va elektr xossalari o'rtasidagi murakkab bog'lanishni ochib beradi. Amorf qotishmalar kristall tartibdan farqli ravishda atomlarning tartibsiz joylashuvi bilan ajralib turadi. O'tkinchi metall qotishmalarida esa d-elektronlarning faol ishtiroki termoelektrik javobni yanada murakkablashtiradi. Ushbu maqolada termoelektrik yurituvchi kuchning temperaturaga bog'liqligi, elektronlarning sochilishi va fononlarning ta'siri asosida tahlil qilinadi.

Termoelektrik yurituvchi kuch temperaturaga sezgir bo'lgan kattalik bo'lib, u materialning issiqlik ta'sirida elektr javobini ko'rsatadi. Amorf qotishma esa kristall tartibi aniq bo'lmagan qattiq jism, o'tkinchi metall esa d-qavati to'liq to'lmagan elementlar guruhi hisoblanadi. Bu mavzuda sizni qiynaydigan jihat shuki, temperatura o'zgarganda natija faqat bitta omil bilan belgilanmaydi. Aksincha, elektronlar harakati, tuzilma tartibsizligi va qotishma tarkibi birgalikda termoelektrik xulqini belgilaydi. Endi shu bog'liqlikning fizik

sabablarini sodda va aniq tartibda ko'rib chiqamiz. Avval asoslarni tushunib olaylik: amorf qotishma va termoelektrik kuch nima? Bu mavzuni to'g'ri anglash uchun avval ikki tayanch tushunchani ajratib olish kerak. Birinchisi, amorf qotishma qanday tuzilganini bilish. Ikkinchisi esa, termoelektrik yurituvchi kuch temperatura farqi ta'sirida qanday paydo bo'lishini tushunish. Shunda keyingi murakkab bog'lanishlar ham ancha ravshan ko'rinadi. Chunki temperaturaga javob berayotgan faqat issiqlikning o'zi emas, balki atomlar tartibi va elektronlarning energiya taqsimoti hamdir.

Amorf tuzilma kristall tuzilmadan nimasi bilan farq qiladi? Kristall jismda atomlar uzoq masofagacha ma'lum tartib bilan joylashadi. Amorf holatda esa bunday uzoq tartib yo'q, atomlar yaqin qo'shnilar darajasida tartib saqlashi mumkin, lekin butun hajm bo'ylab bir xil panjara takrorlanmaydi. Sodda qilib aytganda, kristall panjara tartibli safga o'xshaydi, amorf tuzilma esa zich, lekin aralash joylashgan olomonga o'xshaydi.



Mana shu farq elektr xossalarga bevosita ta'sir qiladi. Kristallarda elektronlar nisbatan aniq davriy maydon ichida harakat qiladi. Amorf qotishmalarda esa uzoq tartib yo'qligi sabab elektronlar ko'proq sochiladi, ya'ni ularning erkin yurishi qiyinlashadi. Natijada elektr qarshilik ortishi, energiya holatlarining taqsimoti o'zgarishi va temperaturaga sezgirlik kuchayishi mumkin. O'tkinchi metall asosidagi qotishmalarda bu holat yanada qiziq. Sababi, bu metallarda d-elektronlar muhim rol o'ynaydi. Ular o'tkazuvchanlik, magnit xossa va energiya sathlari zichligiga kuchli ta'sir qiladi. Agar tuzilma tartibsiz bo'lsa, d-elektronlar bilan bog'liq elektron holatlar ham o'zgaradi. Shu bois amorf o'tkinchi metall qotishmalarida elektr va termoelektrik javob oddiy metallarnikidan farq qiladi. Qisqa ma'noda, amorf holatda atomlar tartibsizligi elektronlar harakatini o'zgartiradi, elektronlar harakati esa termoelektrik xulqni belgilaydi.

Termoelektrik yurituvchi kuch qanday hosil bo'ladi:

Termoelektrik yurituvchi kuch ikki uch orasida temperatura farqi bo'lganda yuzaga keladi. Bir uch issiq, ikkinchisi sovuq bo'lsa, zaryad tashuvchilarning energiyasi bir xil bo'lmaydi. Issiq tomondagi elektronlar kuchliroq harakat qiladi, sovuq tomonda esa ularning o'rtacha energiyasi pastroq bo'ladi. Shu farq tufayli zaryadlar qayta taqsimlanadi va kuchlanish paydo bo'ladi. Buni sodda misolda tasavvur qilish oson. Agar xonaning bir tomonida odamlar tez yurayotgan bo'lsa, ular asta-sekin boshqa tomonga ham siljiydi. Elektronlar ham shunga o'xshash yo'l tutadi. Issiq uchda energiya ko'proq bo'lgani uchun tashuvchilar sovuq tomonga siljishga moyil bo'ladi. Natijada material ichida potensial farq hosil bo'ladi. Bu hodisa Zeebec effekti deb ataladi. Uning miqdoriy o'lchovi esa Zeebec koeffitsiyenti hisoblanadi. U, odatda, hosil bo'lgan kuchlanishning temperatura farqiga nisbatini bildiradi. Agar bu koeffitsiyent katta bo'lsa, demak material temperatura farqiga elektr jihatdan kuchliroq javob beradi. Amorf qotishmalarda Zeebek koeffitsiyenti oddiy metallardagidan boshqacha tutishi mumkin. Chunki bu yerda elektronlarning energiya taqsimoti, sochilishi va lokal tuzilma birgalikda ishlaydi. Shuning uchun temperaturaning ozgina o'zgarishi ham termoelektrik yurituvchi kuchda sezilarli o'zgarish berishi mumkin.

Temperatura oshganda termoelektrik yurituvchi kuch nega o'zgaradi:

Temperatura ortganda termoelektrik yurituvchi kuchning o'zgarishi bitta sabab bilan izohlanmaydi. Bu yerda elektronlar sochilishi, fononlar ta'siri, energiya holatlari zichligi va tarkibiy tartibsizlik bir paytda ish beradi. Shu bois bog'liqlik ba'zan deyarli chiziqli ko'rinadi, ba'zan esa ma'lum temperatura oralig'ida og'adi. Amorf o'tkinchi metall qotishmalarida bu holat yanada yaqqol. Sababi, material ichida uzoq masofali tartib yo'q. Natijada elektronlarning energiyasi, yo'li va tarqalish usuli temperatura bilan birga o'zgaradi. Demak, termoelektrik kuch faqat issiqlik oshgani uchun emas, balki tashuvchilarning butun harakat manzarasi almashgani uchun o'zgaradi.

Elektronlarning sochilishi va tartibsiz tuzilma ta'siri:

Kristall materialda elektron ko'pincha nisbatan tartibli muhitdan o'tadi. Amorf muhitda esa yo'l ancha chalkash bo'ladi. Atomlar joylashuvi bir xil takrorlanmagani uchun elektron bir maromda emas, turli

yo'nalishda tez-tez sochiladi. Buni notekis yo'ldagi harakatga o'xshatish mumkin. Tekis yo'lda yurish oson, g'adir-budir yo'lda esa qadam doim o'zgaradi. Elektronlar ham amorf qotishmada shunday harakat qiladi, shu sabab ularning o'rtacha erkin yo'li qisqaradi va elektr o'tkazuvchanlik o'zgaradi. Temperatura oshganda atom tebranishlari ham kuchayadi. Bu tebranishlar, ya'ni fononlar, elektronlar uchun qo'shimcha to'siq bo'ladi. Natijada sochilish ko'payadi, elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi kuchayadi va termoelektrik yurituvchi kuch ham birga siljiydi. Bu bog'lanishning yana bir tomoni bor. Termoelektrik kuch elektronlarning faqat soniga emas, ularning energiya bo'yicha taqsimotiga ham bog'liq. Agar Fermi sathi yaqinidagi holatlar zichligi temperatura bilan sezilarli almasha, kuchlanish javobi ham o'zgaradi. Shuning uchun bir xil qotishmada ham ayrim oraliqlarda o'zgarish silliq, ayrim oraliqlarda esa keskinroq ko'rinadi. Qisqacha aytganda, amorf muhitda ikki jarayon yonma-yon ketadi.

- Elektronlar tartibsiz tuzilma sabab ko'proq sochiladi.
- Temperatura ortishi bilan fononlar bu sochilishni yanada kuchaytiradi.
- Energiya holatlari zichligidagi nozik siljishlar termoelektrik kuchning ishorasi va qiymatiga ta'sir qilishi mumkin.

Amorf qotishmada temperatura o'zgarishi, elektronning yo'li va energiya manzarasini bir vaqtda o'zgartiradi. Shu sabab elektr o'tkazuvchanlik va termoelektrik kuch ko'pincha bir-biridan ajralmagan holda qaraladi. Biri tashuvchining qanchalik oson harakat qilishini ko'rsatsa, ikkinchisi shu tashuvchilarning energiya bo'yicha qanchalik notekis taqsimlanganini bildiradi.

Past va yuqori temperaturada kuzatiladigan farqlar:

Past temperaturada atom tebranishlari sustroq bo'ladi. Biroq shu paytda ayrim lokal holatlar yoki kvant tabiatli ta'sirlar aniqroq sezilishi mumkin. Ya'ni elektronlar ayrim hududlarda ko'proq ushlanib qoladi, bu esa termoelektrik javobni oddiy chiziqli ko'rinishdan og'diradi. Shunday sharoitda kichik temperatura o'zgarishi ham sezilarli natija berishi mumkin. Sababi, tizimdagi ba'zi energiya holatlari juda yaqin joylashgan bo'ladi. Elektronlar qaysi holatlarni egallashi o'zgarsa, termoelektrik yurituvchi kuch ham darhol javob qaytaradi. Yuqori temperaturada esa boshqa manzara yuzaga chiqadi. Atomlarning tebranishi kuchayadi, fononlar soni ortadi va elektronlar ko'proq sochiladi. Natijada tashuvchilarning harakati yanada diffuz bo'ladi. Ko'p hollarda shu sabab bog'liqlik silliqroq tus oladi, lekin ayrim tarkiblarda baribir og'ish saqlanib qoladi.

Quyidagi taqqoslash asosiy farqni tez anglatadi:

Holat	Ustun ta'sir	Termoelektrik kuchdagi xulq
Past temperatura	Lokal holatlar, kvant ta'sirlar, zaif tebranish	Ba'zan keskinroq yoki nochiziqli o'zgarish
Yuqori temperatura	Kuchli tebranishlar, fonon sochilishi	Ko'proq silliq, lekin tarkibga bog'liq holda og'uvchi o'zgarish

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, farq faqat issiq yoki sovuq degan gap emas. Asosiy masala, qaysi mexanizm ayni temperaturada kuchliroq ishlashida. Shuning uchun amorf o'tkinchi metall qotishmalarida termoelektrik yurituvchi kuchning temperaturaga bog'liqligi ko'pincha murakkab, lekin izchil fizik sabablarga ega bo'ladi.

ADABIYOTLAR:

1. Gallagher, B. L., & Greig, D. *The thermoelectric powers and resistivities of amorphous transition metal alloys. Journal of Physics F: Metal Physics*, 12(8), 1982, pp. 1811–1824.
2. Lauinger, C., Herzog, R., Gentsch, L., Hunger, T., Häussler, P., & Baumann, F. *Thermoelectric power of amorphous alloys near the metal-insulator transition. Czechoslovak Journal of Physics*, 46, 1996, pp. 2443–2444.
3. Mizutani, U. *Introduction to the Electron Theory of Metals*. Cambridge University Press, 2001.
4. Mott, N. F., & Davis, E. A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. Oxford University Press, 2nd Edition, 1979.
5. Greig, D., & Gallagher, B. L. *Transport properties of amorphous transition metal alloys. Philosophical Magazine B*, 45(5), 1982, pp. 569–584.
6. Häussler, P. *Electronic structure and transport in amorphous transition metal alloys. Journal of Non-Crystalline Solids*, 117, 1990, pp. 1–15.
7. Ziman, J. M. *Principles of the Theory of Solids*. Cambridge University Press, 1972.

PHYSICS

8. Cutler, M., & Mott, N. F. *Observation of Anderson localization in amorphous semiconductors. Physical Review*, 181(3), 1969, pp. 1336–1340.
9. Nagel, S. R., & Tauc, J. *Optical and electrical properties of amorphous semiconductors. Reviews of Modern Physics*, 51(2), 1979, pp. 217–274.
10. Mizutani, U., & Häussler, P. *Thermoelectric properties of transition metal-based amorphous alloys. Journal of Materials Science*, 25, 1990, pp. 4457–4464.

КАНОНИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ

*Тураев Фарходжон Фармонович,**Alfraganus University, кафедра «Математика и физика», и.о. доцента (PhD)**farhodjon9618@mail.ru**Болтаев Хабибжон Хамитович,**Национальный педагогический университет Узбекистана имени Низами,**Ташкентский международный университет*

Аннотация. В данной статье изучается теория канонического представления конечных вещественных факторов и их коммутантов. Излагается построение канонического W^* -представления для вещественных W^* -алгебр и анализируются основные свойства этого представления. В частности, установлена связь между каноническим представлением вещественного фактора и его коммутантом, а также показано, что они пространственно $*$ -изоморфны. Кроме того, рассматриваются комплексификация вещественных W^* -алгебр, их естественные структуры, связанные с инволютивными $*$ -антиавтоморфизмами, а также их роль в теории коммутантов. Полученные результаты имеют важное значение для описания канонических представлений в теории вещественных операторных алгебр и для выявления их структурных свойств.

Ключевые слова: W^* -алгебра, вещественный фактор, каноническое представление, коммутант.

ҲАҚИҚИЙ ФАКТОРЛАРНИНГ КАНОНИК ТАСВИРИ

Аннотация. Ушбу мақолада чекли ҳақиқий факторларнинг каноник тасвири ва уларнинг коммутантлари назарияси ўрганилган. Ҳақиқий W^* -алгебралар учун каноник W^* -тасвир қурилиши баён этилиб, ушбу тасвирнинг асосий хоссалари таҳлил қилинган. Хусусан, ҳақиқий факторнинг каноник тасвири ва унинг коммутанти орасидаги боғланиш аниқланган ҳамда уларнинг фазовий $*$ -изоморфизмга эга эканлиги кўрсатилган. Шунингдек, ҳақиқий W -алгебраларнинг комплексификацияси, инволютив $*$ -антиавтоморфизмлар билан боғлиқ табиий тузилмалари ҳамда коммутантлар назариясидаги ўрни ёритилган. Олинган натижалар ҳақиқий оператор алгебралари назариясида каноник тасвирларни тавсифлаш ва уларнинг структуравий хоссаларини аниқлашда муҳим аҳамият касб этади.

Калим сўзлар: W^* -алгебра, ҳақиқий фактор, каноник тасвир, коммутант.

CANONICAL REPRESENTATION OF A REAL FACTORS

Abstract. This article investigates the theory of canonical representations of finite real factors and their commutants. The construction of the canonical W^* -representation for real W^* -algebras is presented, and the main properties of this representation are analyzed. In particular, the relationship between the canonical representation of a real factor and its commutant is established, and it is shown that they are spatially $*$ -isomorphic. In addition, the complexification of real W^* -algebras, their natural structures associated with involutive $*$ -antiautomorphisms, and their role in commutant theory are discussed. The obtained results are of significant importance for describing canonical representations in the theory of real operator algebras and for determining their structural properties.

Keywords: W^* -algebra, real factor, canonical representation, commutant.

Теория алгебр операторов, действующих в гильбертовом пространстве, возникла в 1930-е годы в статьях фон Неймана и Мюррея (см. [1-2]). Они подробно изучили структуру операторных алгебр, которые теперь называются алгебрами фон Неймана, или W^* -алгебрами. В рамках этой теории важное место занимают W^* -алгебры с тривиальным центром, которые называют факторами. В конце 1960-х годов была опубликована серия работ Диксмье, Сакаи и Мак Дuffa, в которых была развита идея центральных последовательностей, позволившая найти новые инварианты Π_1 -факторов и

построить группы, регулярные представления которых порождали факторы, различаемые этими инвариантами (см. [3-5]).

Интересным и актуальным представляется рассмотрение теории индекса Джонса для вещественных алгебр фон Неймана. В конце XX века В.Джонс ввел понятие индекса для конечных алгебр фон Неймана и показал множества возможных значений индекса. При доказательстве этого результата он построил возрастающую последовательность конечных факторов, являющихся алгебрами Гекке. А также, доказал существование Марковского следа на бесконечном объединении алгебр Гекке. Для не конечных алгебр фон Неймана работы по индексам были обобщены японским математиком Х.Косаки [6].

Алгебру всех ограниченных линейных операторов, действующих в комплексном гильбертовом пространстве H , обозначим через $B(H)$. Пусть M – *-подалгебра в $B(H)$. Коммутантом M называется подмножество $M' = \{a \in B(H) : ba = ab, \forall b \in M\}$. Если $M = M''$, то M называется алгеброй фон Неймана, где $M'' = (M')'$. Известно (теорема о бикоммутанте), что M – алгебра фон Неймана тогда и только тогда, когда M – W^* -алгебра, т.е. M – слабо замкнута и $1 \in M$. Пусть M – W^* -алгебра. Множество всех элементов M , коммутирующих со всеми элементами алгебры M , называется центром M и оно обозначается как $Z(M)$. Очевидно, что $Z(M) = M \cap M'$. Элементы $Z(M)$ называют центральными. Алгебру, у которой центральными элементами являются только элементы вида $\lambda \cdot 1$, $\lambda \in \mathbb{C}$, называют фактором. Линейное отображение $\alpha : M \rightarrow M$ называется *-автоморфизмом (соответственно *-антиавтоморфизмом), если $\alpha(x^*) = \alpha(x)^*$ и $\alpha(xy) = \alpha(x) \cdot \alpha(y)$ (соотв. $\alpha(xy) = \alpha(y) \cdot \alpha(x)$), ($\forall x, y \in M$), инволютивным, если $\alpha^2(x) = \alpha(\alpha(x)) = x$, $\forall x \in M$. Пусть $R \subset B(H)$ – вещественная *-подалгебра. Коммутант вещественной *-алгебры R определяется аналогично комплексному случаю: $R' = \{a \in B(H) : ba = ab, \forall b \in R\}$. Непосредственно проверяется, что $(R + iR)' = R' + iR'$.

Если $R = R''$, то R называется вещественной алгеброй фон Неймана. Пусть R – вещественная W^* -алгебра. Наименьшую W^* -алгебру $U(R)$, содержащую R , называем обертывающей W^* -алгеброй для алгебры R . Тогда $U(R) = R + iR$. Кроме того, всякая вещественная W^* -алгебра R порождает естественный инволютивный *-антиавтоморфизм α_R обертывающей W^* -алгебры $U(R)$, а именно: $\alpha_R(x + iy) = x^* + iy^*$, где $x + iy \in U(R)$, $x, y \in R$, такой, что $R = \{x \in U(R) : \alpha_R(x) = x^*\}$; и обратно, если на W^* -алгебре U задан некоторый инволютивный *-антиавтоморфизм α , то множество $\{x \in U : \alpha(x) = x^*\}$ является вещественной W^* -алгеброй [7]. В дальнейшем всякую вещественную W^* -алгебру R мы отождествим с парой (M, α) . Заключая, напомним, что вещественная W^* -алгебра R называется вещественным фактором, если её центр совпадает с $1 \cdot \mathbb{C} = \{\lambda 1, \lambda \in \mathbb{C}\}$; R имеет тип I_n , I_∞ , II_1 , II_∞ или III , если её обертывающая W^* -алгебра имеет соответствующий тип в смысле обычной классификации W^* -алгебры.

Пусть $M \subset B(H)$ – конечный фактор и пусть τ – единственный α – инвариантный точный нормальный след на M . Обозначим через $L^2(M)$ пополнение алгебры M относительно нормы $\|x\|_2 = \tau(x^*x)^{\frac{1}{2}}$. Аналогично, $L^2(M, \alpha)$ – пополнение вещественного фактора (M, α) . Тогда $L^2(M)$ есть гильбертово пространство и $L^2(M) = L^2(M, \alpha) + iL^2(M, \alpha)$. Кроме того, для алгебры $B(L^2(M))$ также имеем: $B(L^2(M)) = B_r(L^2(M, \alpha)) + iB_r(L^2(M, \alpha))$.

Для каждого $x \in M$ определим отображение $\lambda(x)y = xy$ для всех $y \in M$. Так как $\|\lambda(x)y\|_2 \leq \|x\| \|y\|_2$, то λ имеет единственное продолжение на $L^2(M)$, являющееся ограниченным линейным оператором, обозначаемым опять через $\lambda(x)$. Тогда мы получаем точное W^* -представление $(\lambda, L^2(M))$ алгебры M (см. [8]). Аналогично, определяя отображение λ_r как $\lambda_r(x)y = xy$ (для всех $x, y \in (M, \alpha)$), мы получим точное вещественное W^* -представление $(\lambda_r, L^2(M, \alpha))$ алгебры (M, α) .

Предложения 1. Отображение $\beta: \lambda(M) \rightarrow \lambda(M)$, определяемое как $\beta(\lambda_x) = \lambda_{\alpha(x)}$, является инволютивным $*$ -антиавтоморфизмом в $\lambda(M)$ и $(M, \alpha)_\beta = \lambda_r(M, \alpha)$, где $(M, \alpha)_\beta = \{\lambda_x \in \lambda(M) : \beta(\lambda_x) = \lambda_x^*\}$ - вещественная W^* -алгебра, порожденная $*$ -антиавтоморфизмом β , т.е. $(M, \alpha)_\beta = (\lambda(M), \beta)$.

Доказательство. То, что $\beta(\lambda_x) = \lambda_{\alpha(x)}$ является инволютивным $*$ -антиавтоморфизмом, проверяется непосредственно. Пусть теперь, $\lambda_x \in (M, \alpha)_\beta$. Так как $\beta(\lambda_x) = \lambda_x^*$, то $\lambda_{\alpha(x)} = \lambda_x^*$. Отсюда получим, что $\alpha(x) = x^*$, т.е. $x \in (M, \alpha)$. Тогда в силу

$$\lambda_x \in \lambda(M) \subset B(L^2(M)) = B_r(L^2(M, \alpha)) + iB_r(L^2(M, \alpha))$$

мы имеем $(M, \alpha)_\beta \subset B_r(L^2(M, \alpha))$. Отсюда $(M, \alpha)_\beta \subset \lambda_r(M, \alpha)$, так как $\lambda_r(M, \alpha) = \{\lambda_x^r \in B_r(L^2(M, \alpha)) : \text{для } \alpha(x) = x^* \text{ и } \alpha(y) = y^*, \lambda_x^r(y) := xy\}$.

Теперь пусть $\lambda_x^r \in \lambda_r(M, \alpha)$. Тогда $\alpha(x) = x^*$ и $\lambda_x^r \in \lambda_r(M, \alpha) \subset \lambda(M)$. Отсюда $\beta(\lambda_x^r) = \lambda_{\alpha(x)}^r = \lambda_{x^*}^r = (\lambda_x^r)^*$, и, следовательно, $\lambda_x^r \in (M, \alpha)_\beta$. Предложение доказано.

Верно следующее следствие.

Следствие 1. W^* -алгебра $\lambda(M)$ является комплексификацией вещественной W^* -алгебры $\lambda_r \in (M, \alpha)$, т.е. $\lambda_r(M, \alpha) + i\lambda_r(M, \alpha) = \lambda(M)$. Кроме того, пара $\{\lambda_r, L^2(M, \alpha)\}$ является точным вещественным W^* -представлением вещественной W^* -алгебры (M, α) .

Это представление назовём каноническим W^* -представлением алгебры (M, α) .

Далее, так как $\|x\|_2 = \|x^*\|_2$ для любой $x \in M$, то отображение $J: x \rightarrow x^*$ единственным образом может быть продолжено до сопряженно-линейной изометрии $L^2(M)$, которая опять обозначается как J .

Предложения 2. Отображение $\beta': \lambda(M)' \rightarrow \lambda(M)'$, определяемое как $\beta'(\cdot) = J\beta(J \cdot J)J$, является инволютивным $*$ -антиавтоморфизмом алгебры $\lambda(M)'$. Кроме того, множество $\lambda_r(M, \alpha)' = \{\lambda_{x'} \in \lambda(M)' : \beta'(\lambda_{x'}) = \lambda_{x'}^*\}$ является вещественной W^* -алгеброй и W^* -алгебра $\lambda(M)'$ является комплексификацией вещественной W^* -алгебры $\lambda_r(M, \alpha)'$, т.е.

$$\lambda_r(M, \alpha)' + i\lambda_r(M, \alpha)' = \lambda(M)'.$$

Между алгебрами $\lambda_r(M, \alpha)'$ и $\lambda_r(M, \alpha)$ имеется следующая связь.

Теорема 3. Имеет место: $\lambda_r(M, \alpha)' = J\lambda_r(M, \alpha)J$.

Доказательство. Так как $\lambda_x \in \lambda_r(M, \alpha)$ влечет $J\lambda_x J \in J\lambda_r(M, \alpha)J$ и $\beta(\lambda_x) = \lambda_x^*$, то мы имеем

$$\beta'(J\lambda_x J) = J\beta(JJ\lambda_x JJ)J = J\beta(\lambda_x)J = J\lambda_x^*J = (J\lambda_x J)^*.$$

Отсюда $J\lambda_x J \in \lambda_r(M, \alpha)'$, т.е. $J\lambda_r(M, \alpha)J \subset \lambda_r(M, \alpha)'$.

Обратно, пусть $\lambda_{x'} \in \lambda_r(M, \alpha)' \subset \lambda(M)' = J\lambda(M)J$. Тогда $\lambda_{x'} = J\lambda_y J$ для некоторого $\lambda_y \in \lambda(M)$. Так как $\beta(\lambda_{x'}) = \lambda_{x'}^*$, то имеем $\beta'(J\lambda_y J) = J\lambda_y^*J$, т.е. $J\beta(JJ\lambda_y JJ)J = J\lambda_y^*J$. Отсюда $J^2\beta(\lambda_y)J^2 = J^2\lambda_y^*J^2$, т.е. $\beta(\lambda_y) = \lambda_y^*$. Следовательно, $\lambda_y \in \lambda_r(M, \alpha)$. Таким образом, мы получим $\lambda_{x'} = J\lambda_y J = J\lambda_r(M, \alpha)J$ и $\lambda_r(M, \alpha)' \subset J\lambda_r(M, \alpha)J$. Предложения доказана.

Предложения 3. Вещественная W^* -алгебра $\lambda_r(M, \alpha)'$ является коммутантом вещественной W^* -алгебры $\lambda_r(M, \alpha)$ относительно $B_r(L^2(M, \alpha))$, т.е. $\lambda_r(M, \alpha)' = \{\lambda_x \in B_r(L^2(M, \alpha)) : \lambda_x \lambda_y = \lambda_y \lambda_x, \forall \lambda_y \in \lambda_r(M, \alpha)\}$.

Доказательство. Аналогично доказательству предложение 1 для $\beta'(\lambda_x) = \lambda_x^*$ мы имеем $\lambda_x \in B_r(L^2(M, \alpha))$. Отсюда $\lambda_r(M, \alpha)' \subset B_r(L^2(M, \alpha))$. С другой стороны, для любых $\lambda_x \in \lambda_r(M, \alpha)' \subset \lambda(M)'$ и $\lambda_y \in \lambda_r(M, \alpha) \subset \lambda(M)$, мы имеем $\lambda_x \lambda_y = \lambda_y \lambda_x$. Предложения доказана.

Теперь, и в дальнейшем, исследуем отношения между каноническим представлением и точными невырожденными W^* -представлениями.

Теорема 2. Пусть $M_1 \subset B(H_1)$ и $M_2 \subset B(H_2)$ – W^* -алгебры и пусть α_i – инволютивный *-антиавтоморфизм алгебры M_i , $i=1, 2$. Если $\Phi : M_1 \rightarrow M_2$ – нормальный *-гомоморфизм с $\Phi \circ \alpha_1 = \alpha_2 \circ \Phi$, то

$$\Phi = \Phi_3 \circ \Phi_2 \circ \Phi_1,$$

где

1) $\Phi_1 : M_1 \rightarrow M_1 \bar{\otimes} \mathbf{1}_L$ – *-гомоморфизм с $\Phi_1 \circ \alpha_1 = \tilde{\alpha}_1 \circ \Phi_1$, определяемый как $\Phi(a) = a \otimes \mathbf{1}_L$, где $\mathbf{1}_L$ – единичный оператор на подходящем гильбертовом пространстве L и $\tilde{\alpha}_1 = \alpha_1 \otimes id$;

2) $\Phi_2 : M_1 \bar{\otimes} \mathbf{1}_L \rightarrow (M_1 \bar{\otimes} \mathbf{1}_L)p'$ – *-гомоморфизм с $\Phi_2 \circ \tilde{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_1 \circ \Phi_2$, определяемый как $\Phi_2(a \otimes \mathbf{1}_L) = (a \otimes \mathbf{1}_L)p'$, где $p' \in (M_1 \bar{\otimes} \mathbf{1}_L)'$ – проектор с $\tilde{\alpha}_1'(p') = p'$ и $\tilde{\alpha}_1' = J_1 \tilde{\alpha}_1 (J_1(\cdot)J_1)J_1 \otimes id$, $\bar{\alpha}_1(\cdot p') = \tilde{\alpha}_1(\cdot)p'$;

3) $\Phi_3 : (M_1 \bar{\otimes} \mathbf{1}_L)p' \rightarrow M_2$ – *-изоморфизм с $\Phi_3 \circ \tilde{\alpha}_1 = \alpha_2 \circ \Phi_3$.

Теорема 3. Пусть M – конечный фактор и пусть α – инволютивный *-антиавтоморфизм алгебры M . Если $\{\pi, H\}$ – точное невырожденное W^* -представление алгебры M и $\pi \circ \alpha = \tilde{\alpha} \circ \pi$, где $\tilde{\alpha}$ – инволютивный *-антиавтоморфизм алгебры $\pi(M)$, то существуют проектор $p' \in (\lambda_r(M, \alpha) \otimes \mathbf{1}_{K_r})'$ и унитарный оператор $u : H_r \rightarrow p'(L^2(M, \alpha) \otimes K_r)$ такие, что $u\pi(x) = (\lambda(x) \otimes \mathbf{1}_K)u$, $x \in M$, т.е. вещественные W^* -алгебры $\pi(M, \alpha)$ ($= (\pi(M), \tilde{\alpha})$)

и $(\lambda_r(M, \alpha) \otimes \mathbf{1}_{K_r})p'$ являются пространственно $*$ -изоморфными, где K_r – сепарабельное бесконечномерное вещественное гильбертово пространство и $K = K_r + iK_r$.

Доказательство. Положим $M_1 = \lambda(M)$ и $M_2 = \pi(M)$. Определим отображение $\Phi: M_1 \rightarrow M_2$ как $\Phi(\lambda(x)) = \pi(x)$. Тогда Φ является $*$ -изоморфизмом и $\Phi(\lambda_r(M, \alpha)) \subset (\pi(M), \tilde{\alpha})$. Теперь утверждение теоремы непосредственно следует из теоремы 2 и сепарабельности пространства H .

ЛИТЕРАТУРА:

1. Murray F., von Neumann J. On rings of operators. // I Ann. Math., 1936, Vol. 37. P. 116-229.
2. Фон Нейман Дж. Избранные труды по функциональному анализу. // I., II Изд. "Наука", Москва, 1987, 370 с.
3. Dixmier J. Von Neumann algebras. // Amsterdam etc., North-Holland publ., 1981, Vol. 36, 437 p.
4. Sakai S. C*-algebras and W*-algebras. // Berlin: Springer, 1971, IX+256 p.
5. Мак Дуфф Д. К структуре Π_1 - факторов. // Успехи мат. наук., 1970, Т. XXV, 6, 156, С. 29-53.
6. Kosaki H., Extension of Jones' Theory on index to arbitrary factors, J.Funct. Anal. 66 (1986) 123-140.
7. Аюнов Ш.А. Классификация и представление упорядоченных йордановых алгебр. // Ташкент, Изд. "ФАН", 1986, .121 с.
8. Jones V. Sunder V. S. Introduction to Subfactors, Lon. Mat. Soc., 234, (1997), 162.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Ташпулатова Дилдора Хайдаркуловна,

Джизакский Государственный Педагогический Университет,

Урозов Абдухалик Нурматович,

Джизакский Государственный Педагогический Университет,

Наркулов Сайдулла Каримович,

Джизакский Политехнический Институт

dildoratoshpulatova987d@gmail.com

Аннотация. Целью этой статьи является объяснение различия между различными приемами излучения с различными регулировками угла наклона. Было показано, что годовая кумулятивная энергия солнечного излучения, полученная при ежемесячном угле наклона, может быть примерно на 7% выше, чем достигаемая при установке угла наклона за год. Кроме того, сезонные и двухгодичные углы наклона имеют примерно на 6% больше годового кумулятивного поглощения излучения, чем установка угла наклона за год. Более того, принимая во внимание аналогичное ежемесячное получаемое излучение, результаты показывают, что полученное излучение при ежемесячной настройке угла наклона было на 20% больше в летние месяцы, чем при ежегодной корректировке угла наклона.

Ключевые слова: фотоэлектрическая панель; солнечный; оптимальный угол наклона; энергия; солнечные элементы, температура, излучение, эффективность, MATLAB, моделирование.

THE EFFECT OF TEMPERATURE AND RADIATION ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A PHOTOVOLTAIC CELL

Abstract. The aim of this article is to explain the differences between various radiation reception methods with different tilt angle adjustments. It was shown that the annual cumulative solar radiation energy obtained using monthly tilt angles can be approximately 7% higher than that achieved using a fixed annual tilt angle. In addition, seasonal and biannual tilt angles provide about 6% more annual cumulative absorbed radiation compared to a fixed annual tilt angle. Furthermore, considering similar monthly received radiation, the results show that the radiation obtained with monthly tilt angle adjustment is about 20% higher in the summer months than with annual tilt angle adjustment.

Keywords: photovoltaic panel; solar; optimal tilt angle; energy; solar cells; temperature; radiation; efficiency; MATLAB; modeling.

HARORAT VA NURLANISHNING FOTOELEKTRIK ELEMENTNING ELEKTR XUSUSIYATLARIGA TA'SIRI

Annotatsiya. Ushbu maqolaning maqsadi turli og'ish burchagi sozlamalari bilan nurlanishni qabul qilish usullari o'rtasidagi farqlarni tushuntirishdan iborat. Shu ko'rsatildiki, oylik og'ish burchaklari asosida olingan yillik umumiy quyosh nurlanish energiyasi yillik bitta o'rnatilgan burchakka nisbatan taxminan 7% ga yuqori bo'lishi mumkin. Bundan tashqari, mavsumiy va yarim yillik og'ish burchaklari yillik umumiy yutilgan nurlanishni yillik burchakka nisbatan taxminan 6% ga oshiradi. Shuningdek, oylik olingan nurlanish bir xil bo'lganda, natijalar shuni ko'rsatadiki, yoz oylarida oylik sozlangan og'ish burchagi orqali olingan nurlanish yillik sozlashga nisbatan 20% ga ko'proq bo'ladi.

Kalit so'zlar: fotoelektrik panel, quyosh, optimal og'ish burchagi, energiya, quyosh elementlari, harorat, nurlanish, samaradorlik, MATLAB, modellashtirish.

Введение. Солнечные батареи — это устройства, которые преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию, не оказывая вреда окружающей среде. Чтобы предсказать реальное поведение солнечных элементов, например, изменения максимальной мощности, тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, путем изменения температуры и освещенности, можно изучить с помощью MATLAB (имитационная модель). В этой статье модель MATLAB с одним

диодом используется для изучения изменений в солнечном фотоэлектрическом модуле при изменении температуры (100 °C, 200 °C, 300 °C) и изменении освещенности (400 Вт/м², 600 Вт/м², 800 Вт/м²) [1-3]. Для исследования изменения электрических параметров солнечных фотоэлектрических модулей KD330GX-LFB и KD325GX-LFB взяты экспериментальные данные, результаты которых обсуждены в заключении.

Постоянное использование ископаемого топлива в промышленных целях приводит к огромному ущербу экосистеме и условиям жизни. Чтобы поддерживать нашу Землю, человечеству необходимо сократить выбросы парниковых газов, таких как CO₂, метан и т. д., выбирая альтернативы ископаемому топливу. Чтобы сохранить естественное жизненное пространство и не нанести вред следующему поколению, необходимо увеличить использование возобновляемых источников энергии. Среди всех возобновляемых источников энергии солнечная энергия имеет большой потенциал, но небольшое ее количество используется для различных целей. Фотоэлектрический эффект преобразует солнечную энергию в электрическую. Широко распространенными применениями фотоэлектрических систем являются водонагреватели, уличные фонари, электромобили, военные и космические приложения. Солнечные панели и модули работают по принципу фотоэлектрического эффекта и генерируют электроэнергию. На эти фотоэлектрические модули и панели в значительной степени влияют различные погодные условия. В этой статье в основном объясняются параметры моделирования. Изменяя температуру фотомодуля Simulink, можно наблюдать изменения выходных параметров. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными результатами KD330GX-LFB, KD325GX-LFB [4].

Солнечная энергия преобразуется в электрическую непосредственно с помощью полупроводниковых материалов, используемых в фотоэлектрических (PV) панелях. Несмотря на большие достижения в технологии полупроводниковых материалов, в последние годы эффективность панелей очень низкая. На эффективность панели влияет множество факторов, таких как угол наклона, затенение, пыль, уровень солнечной радиации, температура и потери в проводке. Среди этих факторов более важными являются уровень солнечной радиации и температура. Уровень солнечной радиации, попадающей на фотоэлектрические панели, варьируется в зависимости от местоположения панели и временных интервалов в сутки. Таким образом, уровень солнечной радиации напрямую влияет на мощность панели. В результате снижение уровня солнечной радиации снижает мощность панели. С другой стороны, существует обратная пропорция между температурой и мощностью панели. Другими словами, мощность панели снижается по мере повышения температуры окружающей среды. В этом исследовании эквивалентная схема панели моделируется в MATLAB с использованием каталожных данных фотоэлектрической панели, а также исследуются влияние температуры и солнечного излучения на мощность фотоэлектрической панели [5].

В последние годы наблюдается большой спрос на электроэнергию из-за роста населения и темпов индустриализации. Большая часть электроэнергии вырабатывается за счет ископаемого топлива, такого как нефть, природный газ и змеевик. Однако в связи с использованием ископаемого топлива возникает множество экологических проблем. Более того, тот факт, что эти источники энергии иссякнут в ближайшее время будущее привело к использованию возобновляемых источников энергии. Солнечная энергия – один из возобновляемых источников энергии – косвенно влияет на формирование других возобновляемых источников энергии. Кроме того, солнечная энергия стала более привлекательной, поскольку она чиста, возобновляема и проста в использовании [1, 2].

Солнечная батарея — это наименьшая часть фотоэлектрических систем, непосредственно преобразующая солнечное излучение в напряжение постоянного тока. Солнечные элементы образуют фотоэлектрический модуль, соединяясь последовательно или параллельно. Фотоэлектрическая панель с необходимыми значениями тока, напряжения и мощности получается путем последовательно-параллельного соединения модулей [3, 4]. Солнечная энергия на фотоэлектрической панели преобразуется в электрическую энергию с эффективностью 6-20% в зависимости от полупроводникового материала, используемого в фотоэлектрической панели. Существует множество факторов, приводящих к низкой эффективности панели, таких как угол наклона панели, затенение, пыль, уровень солнечной радиации, температура и другие потери [5, 6]. Среди этих факторов более заметными являются уровень солнечной радиации и температура.

Уровень солнечной радиации. Среднегодовой ход уровня внеземной солнечной радиации составляет 1367 Вт/. С другой стороны, уровень солнечной радиации, падающий на Землю, меньше уровня внеземной солнечной радиации и варьируется в зависимости от географического положения стран [7]. Изменения атмосферных условий, таких как уровень солнечной радиации и температура в

течение дня, оказывают большое влияние на эффективность панели. Поэтому очень важно знать уровень солнечной радиации и влияние температуры на фотоэлектрическую панель. Тем не менее, в каталогах, которые проводятся в лабораторных условиях и называются стандартными, фирмы-производители панелей приводят только электрические характеристики фотоэлектрической панели при уровне солнечного излучения 1000 Вт/м^2 , температуре ячейки 25°C и расходе воздушной массы АМ 1,5. В результате электрические параметры фотоэлектрической панели, отличающиеся от STC, неизвестны. Необходимо знать электрические параметры фотоэлектрических панелей в атмосферных условиях. Учет этих условий, особенно при проектировании автономных и сетевых систем, даст более точные результаты [8, 9].

Многие исследователи разработали модель фотоэлектрических панелей в программе Matlab/Simulink в зависимости от базовой схемы замещения фотоэлектрического элемента, принимая во внимание факторы окружающей среды, такие как солнечное излучение и температура [10-12]. В этих исследованиях эквивалентная схема фотоэлектрической панели моделируется в MATLAB с использованием каталожных значений панели и эффектов изменений при температурах $0, 25, 50^\circ\text{C}$ и $200, 400, 600, 800, 1000 \text{ Вт/м}^2$ исследуются уровни солнечной радиации по току, напряжению и мощности панели. В разделе результатов оцениваются наиболее подходящие уровни температуры и солнечного излучения для фотоэлектрических панелей в зависимости от анализа моделирования.

Математическая модель фотоэлектрического элемента. Получение эквивалентной схемы фотоэлектрического элемента играет решающую роль для изучения электрической энергии, получаемой от фотоэлектрических панелей. Солнечные элементы моделируются диодами, поскольку они изготовлены из полупроводниковых материалов. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента действует как диод, когда он не принимает солнечное излучение. Генерация электроэнергии в солнечном элементе представлена источником тока, а потери в фотоэлектрических элементах представлены последовательными и параллельными сопротивлениями. Электрическая эквивалентная схема фотоэлектрического элемента показана на рис.1 [8].

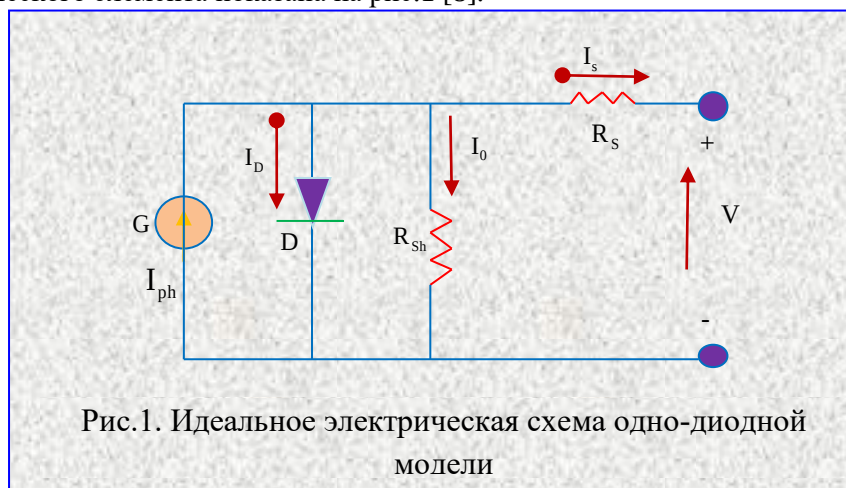


Рис. 1. Эквивалентная схема фотоэлектрического элемента

Практическая модель одиночного солнечного элемента показана на рис. 1. В этой схеме R_s представляет собой последовательное сопротивление ячейки PN-перехода, а R_{sh} представляет собой шунтирующее сопротивление, которое обратно пропорционально току утечки на землю. Последовательный резистор оказывает большое влияние на ВАХ солнечного элемента. I_d - ток диода и ток утечки шунта, где ток выходного вывода I оценивается путем применения KCL в эквивалентной схеме солнечного элемента [3,5]:

$$I = I_{ph} - (I_d + I_{sh}). \quad (1)$$

Это уравнение упрощается путем принятия суммы тока насыщения и тока утечки шунта в качестве, и, следовательно, упрощенное уравнение выглядит так [3]:

$$I = I_{ph} - I_0. \quad (2)$$

Фотонный ток генерируется при поглощении солнечного излучения солнечным элементом, поэтому значение фототока напрямую связано с изменением солнечной радиации и температуры, а именно [3]:

$$I_{ph} = (I_{scr} + k_i DT) \frac{G}{G_r} \quad (3)$$

Где в этом уравнении I_{scr} — номинальный солнечный ток при номинальных погодных условиях (250С и 1000 Вт/м2), k — температурный коэффициент короткого замыкания. G — солнечное излучение в Вт/м2, а G_r — номинальная освещенность в нормальных погодных условиях (250°С и 1000 Вт/м²). DT - разница рабочей температуры и номинальной температуры ($T - T_{rf}$). С другой стороны, обратный ток насыщения солнечного элемента будет рассчитываться по формуле [7]:

$$I_o = I_{rs} \frac{\left(\frac{T}{T_{rf}} \right)^3 \exp \left(- \frac{E_g}{k T_{rf}} \right)}{\left(\frac{T}{T_{rf}} \right)^3 \exp \left(- \frac{E_g}{k T} \right)} \quad (4)$$

где I_{rs} — обратный ток насыщения ячейки для номинальных значений температуры и энергетической освещенности, а E_g — ширина запрещенной зоны полупроводникового материала. Значения I_{ph} и I_o расширят значение I , и оно будет следующим [5, 6]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \frac{\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{nkT} \right) - 1}{\exp \left(\frac{q(V_{oc} + I_{oc} R_s)}{nkT} \right) - 1} \quad (5)$$

Моделирование фотоэлектрической панели. Поликристаллическая фотоэлектрическая панель Perligh PLM-100P/12 мощностью 150 Вт моделировалась в программе Matlab с использованием эквивалентной схемы панели. Каталожные данные фотоэлектрической панели приведены в таблице 1.

Таблица 1. Электрические характеристики солнечных модулей PS-P36 150 Вт

Электрические характеристики солнечных модулей PS-P36 150 Вт	
Максимальная мощность (Pmaxs)	150,04 Вт
Напряжение при Pmax (Вмпс)	18,41 В
Ток при Pmax (Импс)	8,15 А
Ток короткого замыкания (Iscs)	8,63 А
Напряжение холостого хода (Vocs)	22,06 В
Температурный коэффициент Isc (KI)	0,058 А/°C
Температурный коэффициент Voc (KB)	-0,33 В/°C
Количество ячеек в серии (Ns)	36

Результаты и их обсуждения.

1. Вольт- амперные характеристики

Вольт- амперные (кривая I-V) и вольт- ваттные (кривая P-V) характеристики соответственно при различной освещенности (солнечное излучение со значениями 1000, 800, 600, 400, 200 и 550 Вт/м²) при постоянной температуре показаны на Рис. 2.

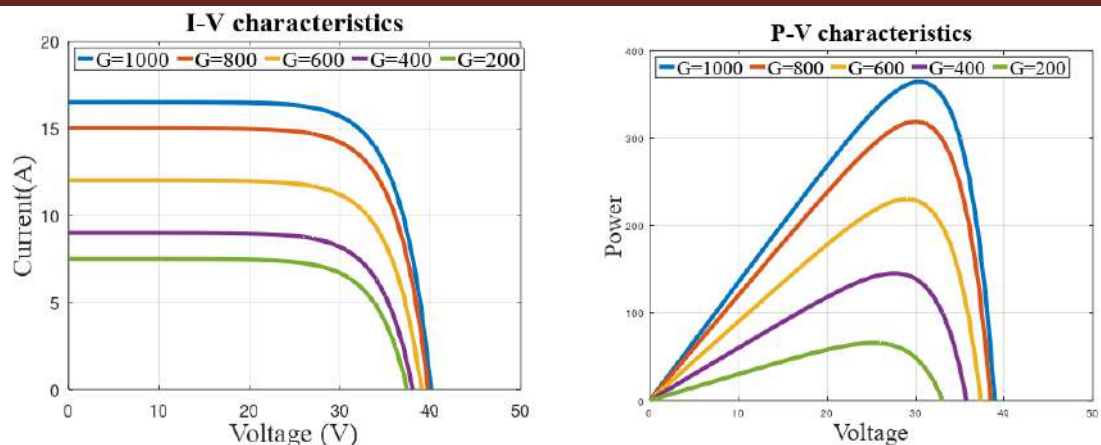


Рис.2. Вольт- амперные (кривая I-V) и вольт- ваттные (кривая P-V) характеристики при различной освещенности (солнечное излучение со значениями 1000, 800, 600, 400 и 200 Вт/м²) при постоянной температуре, соответственно

В реальной работе солнечное излучение со значениями 1000, 800, 600, 400 и 200 Вт/м², что является средним значением при естественной температуре 25°C. На графике видно, что ток фотоэлектрической камеры зависит от температуры корпуса. Однако при облучении ток и напряжение фотоэлемента увеличиваются. Это приводит к выходной мощности в этом рабочем состоянии. С увеличением солнечной радиации становится ясно, что ток короткого замыкания и напряжение холостого хода увеличиваются, как показано на рисунке. Это связано с тем, что когда больше солнечного света падает на солнечный элемент, электроны получают более высокую энергию возбуждения, тем самым увеличивая подвижность электронов и, таким образом, вырабатывается больше энергии, как показано на Рис. 2.

2. Влияние температуры на характеристики фотоэлектрической системы. Повышение температуры вокруг солнечного элемента негативно влияет на возможность выработки электроэнергии. Повышение температуры сопровождается уменьшением значения напряжения холостого хода, как показано на Рис. 3. Повышение температуры вызывает увеличение ширины запрещенной зоны материала, и поэтому для преодоления этого барьера требуется больше энергии. Таким образом, выходная мощность будет уменьшена и, следовательно, эффективность солнечной батареи уменьшена. На Рис. 3 показаны кривые V-P и I-P характеристики при изменении температуры солнечной ячейки.

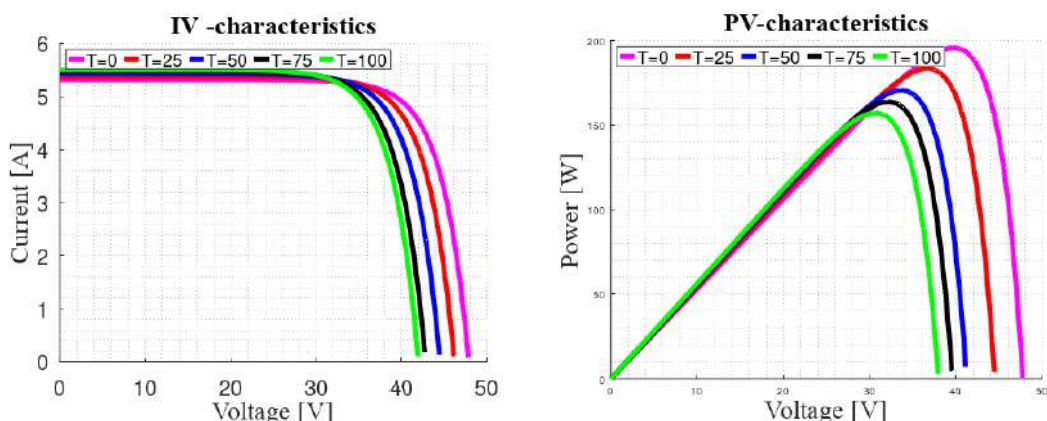


Рис. 3. Вольт-амперные (кривая I-V) и вольт-мощность (кривая P-V) характеристики при различной температуры (температуры со значениями 0, 25, 50, 75 и 100° C) при постоянном солнечном освещении, соответственно

Один из входных параметров изменение температуры оказывает основное влияние на производительность модуля. Влияние температуры на KYOCERA KD330GX-LFB наблюдается при изменении температуры от 100°C до 300°C с шагом 100°C. Соответствующие изменения заносятся в таблицу и сравниваются с практическими значениями. Сопротивления для модели Simulink

идентифицируются с помощью численного метода Ньютона-Рапсона. Сопротивления $R_s=0,2500$ Ом и $R_p=493,206$ Ом.

Таблица 2: Изменение физических характеристик в зависимости от температуры

Параметры KD330GX-LFB $G=1000\text{W/m}^2$	Изменение физических характеристик в зависимости от температуры				
T, °C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C
$I_{sc}=8.69(\text{A})$	8.75	8.77	8.80	8.80	8.80
$V_{oc}=49.7(\text{V})$	54.8	51.6	48.2	48.2	48.2
$I_{mp}=8.07(\text{A})$	8.15	8.08	8.11	8.11	8.11
$V_{mp}=40.3(\text{V})$	45.5	42.5	39	39	39
P_{max}, W	371	343.4	316.2	310.0	306.2

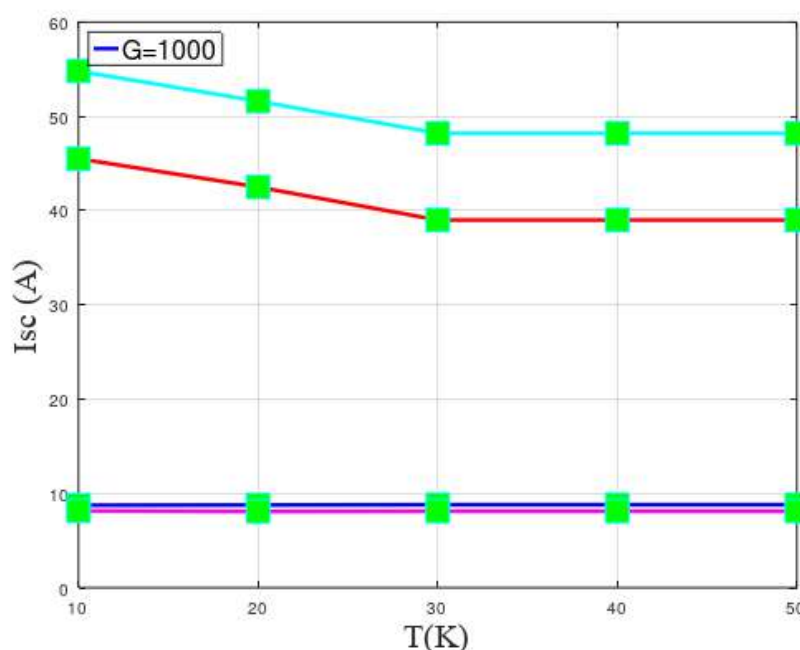


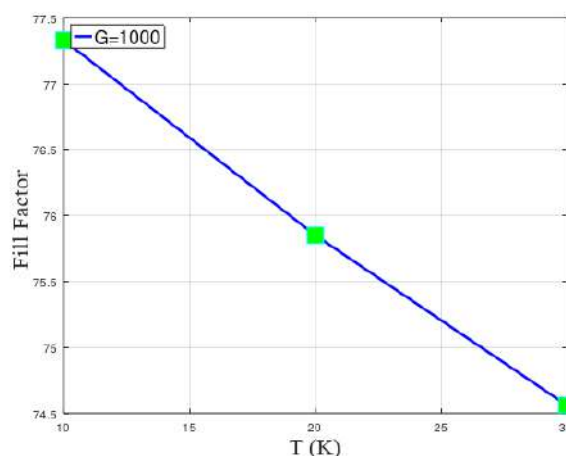
Таблица-3: Изменение эффективности в зависимости от температуры

Температура(°C)	Фактор интенсивности (%)	КПД (%)
10	77.33	17.57
20	75.85	16.27
30	74.56	14.99

Изменение температуры KYOCERA KD330GX-LFB наблюдается для температур 100 °C, 200 °C, 300°C, а изменения P_{max} , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} , I_{sc} взяты из графиков IV, PV и эти значения сведены в таблицы. Сопротивления для модели Simulink KD330GX-LFB определены с использованием метода Newton_Raphon, их значения составляют $R_p=493,206$ Ом и $R_s=0,2500$.

Таблица-4: Изменение эффективности в зависимости от освещенности

Излучение(W/m^2)	Фактор интенсивности (%)	КПД (%)
400	75.65	14.69
600	75.90	15.10
800	75.56	15.6



Путем изменения освещенности: эффективность солнечного модуля зависит от входной переменной освещенности, при изменении освещенности с 400 Вт/м^2 до 800 Вт/м^2 выходная эффективность модуля меняется. Чтобы изучить изменения в производительности солнечного фотоэлектрического модуля, KD330GX- LFB и KD325GX-LFB исследованы, результаты сведены в таблицу.

Заключение. Из Таблицы 1 и 3 видно, что по мере увеличения температуры максимальная мощность снижается напряжение холостого хода и увеличивается ток короткого замыкания, в конечном итоге эффективность снижается. В Таблицах 2 и 4 показано изменение эффективности и коэффициента заполнения, из которых мы можем сделать вывод, что с повышением температуры эффективность снижается. Это происходит из-за усиления внутренней рекомбинации. При увеличении тепловой энергии запрещенная зона полупроводника уменьшает напряжение холостого хода, которое является функцией запрещенной зоны, уменьшается быстрее, чем увеличение тока короткого замыкания, что приводит к снижению эффективности. Отрицательный температурный коэффициент кремниевого материала показывает, что с увеличением температуры максимальная выходная мощность снижается. В Таблицах 5 и 7 представлены изменения параметров солнечного элемента при изменении освещенности. В Таблицах 6 и 8 представлены изменения эффективности и коэффициента заполнения при изменении освещенности. По мере увеличения освещенности количество фотонов, падающих на модуль, создает максимальную мощность и приводит к увеличению эффективности. Эта обобщенная модель Simulink используется для изучения изменений выходных параметров любого фотоэлектрического модуля с помощью метода Ньютона-Рапсона.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Станфорд, Дж. М. Солнечные электрические систем. — М.: Энергия, 2016. — 512 с.
2. Беннет, М. Фотовольтаика и солнечная энергетика. — СПб.: Политехника, 2017. — 256 с.
3. Кравченко, М. Основы солнечной энергетика. — М.: Наука, 2015. — 420 с.
4. Kalogirou, H. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. . — 2nd ed. — Oxford: Elsevier, 2014. — 540 p.
5. ATB NREL. Annual Technology Baseline Reports. National Renewable Energy Laboratory. — Golden, CO: NREL, 2019.
6. IEA PVPS. Trends in Photovoltaic Applications. International Energy Agency. — Paris: IEA, 2020.
7. Виссарионов В. П., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008.-С. 49-61.
8. Коробатов Д. В., Серадская О. В., Сироткин Е. А. Система автоматической очистки поверхности солнечного модуля. Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). - 2016. - № 11-12. - С. 59-68.
9. Lugo Laguna D., Arcos Vargas A., NMez Hernandez F. A European Assessment of the Solar Energy Cost: Key Factors and Optimal Technology // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 6. 3238.
10. Farracho A., Castro R. Broad Spectrum Technical and Economic Assessment of a Solar PV Park: A Case Study in Portugal.Processes. 2024. Vol. 12, No. 6. 1143.

11. Paul W. S. Jr, William S. C., Taiping Z. (2016) *Surface meteorology and Solar Energy (SSE)*, <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/documents/SSE6Methodology.pdf> Accessed on 11 January 2017.

12. Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A. (1990) *Evaluation of hourly tilted surface radiation models. Solar Energy*, 45(1), 9-17.

Номенклатура

НОМЕНКЛАТУРА	
$k_B = 1,381 \text{ e-23};$	Постоянная Больцмана, Дж/К
$q = 1,602 \text{ e-19};$	Электронный заряд, Кл
$N = 1,3;$	Фактор качества диода
$E_g = 1,12;$	Ширина запрещенной зоны, В
$N_s = 36;$	Количество последовательных ячеек
$T_{ref} = 0 + 273; \%$	Температура, для которой известны значения
$T_a = 25;$	Температура, для которой необходимо найти значения
$V_{oc} = 22,06;$	Напряжение холостого хода, В
$I_{sc} = 8,63;$	Ток короткого замыкания, А
$G = 1000;$	Освещенность, Вт/м ²
$K_0 = 0,0058;$	Температурный коэффициент
I_{ph} -	Ток, создаваемый падающим светом, А
I_s -	Ток насыщения обратного смещения диода, А
I_{sh} -	Сопротивления шунта, А
I_{sc} -	Ток короткого замыкания, А
I_{pv} -	Выходной ток, А
V_{pv} -	Напряжение на клеммах, В
V_{ph} -	Фотоэлектрическое напряжение, В
I_d -	Ток диода, А
V_{oc} -	Напряжение холостого хода, А
R_s -	Последовательное сопротивление, Ом
R_{sh} -	Шунтирующее сопротивление, Ом
n -	Коэффициент идеальности диода
V_{mp} -	Напряжение в точке максимальной мощности, В
I_{mp} -	Ток в точке максимальной мощности, А
a	Коэффициент идеальности диода для одной модели диода.
V_T	Тепловое напряжение модуля, В
V_{oc}	Холостое напряжение, В
K_v	Температурный коэффициент напряжения холостого хода
K_I	Температурный коэффициент тока короткого замыкания.

КВАЗИНУКЛОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

Саидханов Насир Шакирович.,

д.ф.-м.н., профессор,

Физико-технический институт им. С.А.Азимова АН РУз

said@uzsci.net.

Аннотация. Обоснована важность изучения нуклон-нуклонных взаимодействий для построения современных теоретических моделей. Описаны критерии отбора квазинуклонных (pN) взаимодействий в фотоэмульсии.

Показано, что в квазинуклонных взаимодействиях энергетическая зависимость средних множественностей хорошо описывается обычными параметризациями, включающими в себя логарифм энергии. Во всей рассматриваемой области первичных энергий исследованы разности средних множественностей $ppEm$ и $pNEm$ которые практически не зависят от энергии соударения, будучи приблизительно равной $0,6 \pm 0,1$. Объяснена причина этого явления, связанное с тем, что неучет когерентных реакций занижает среднюю множественность в нечетнолучевых событиях, а вклад когерентных реакций, возрастает с энергией взаимодействия.

Сделан вывод о том, что ядерные эффекты заметным образом сказываются на характеристиках квазинуклонных соударений в эмульсии, что позволяет предположить, что отобранные взаимодействия содержат некоторую примесь ядерных (многонуклонных) взаимодействий первичных протонов.

Проведено сравнение экспериментальных данных с предсказаниями лундской модели для свободных pN -соударений. В рассматриваемых на опыте квазинуклонных взаимодействиях наблюдается недостаток событий с малыми множественностями, связанный с недостаточно высокой эффективностью просмотра «вдоль следа» первичных протонов в фотоэмульсии. Как показывает анализ, при таком просмотре могут пропускаться события, связанные с дифракционной диссоциацией нуклона-мишени на небольшое число заряженных частиц.

Ключевые слова: протон, нейтрон, квазинуклонные взаимодействия, фотоэмульсия, множественность, модель, когерентные реакции, дифракционная диссоциация, эффективность, мишень.

YADRO FOTOEMULSIYASIDAGI KVAZI-NUKLON O'ZARO TA'SIRLASHUVLARI

Annotatsiya. Zamonaviy nazariy modellarni yaratish uchun nuklon-nuklon o'zaro ta'sirini o'rganishning ahamiyati asoslangan. Fotoemulsiyada kvazi-nuklon (pN) o'zaro ta'sirlarini tanlash mezonlari tavsiflangan. Kvazi-nuklon o'zaro ta'sirlarida o'rtacha ko'plamchilikning energiyaga bog'liqligi energiya logarifmini o'z ichiga olgan an'anaviy parametrlashlar bilan yaxshi tavsiflanganligi ko'rsatilgan. O'rtacha ko'plamchilikning $ppEm$ va $pNEm$ o'rtasidagi farqlar ko'rib chiqilayotgan butun birlamchi energiya diapazonida o'rganildi. Bu farqlar to'qnashuv energiyasiga deyarli bog'liq bo'lmay, taxminan $0,6 \pm 0,1$ ga teng. Bu hodisaning sababi quyidagicha tushuntiriladi: kogerent reaksiyalarni e'tiborga olmaslik to'q nurli hodisalarning o'rtacha ko'plamchilikni kamaytiradi, kogerent reaksiyalarning hissasi esa o'zaro ta'sir energiyasi bilan ortadi. Bundan yadro effektlari emulsiyalardagi kvazi-nuklon to'qnashuvlarining xususiyatlariga sezilarli darajada ta'sir qiladi, degan xulosaga kelish mumkin, bu tanlangan o'zaro ta'sirlar birlamchi protonlarning yadroviy (ko'p nuklonli) o'zaro ta'sirlarining ba'zi aralashmalarini o'z ichiga olishini ko'rsatadi.

Erkin pN to'qnashuvlari uchun eksperimental ma'lumotlar Lund modelining bashoratlari bilan taqqoslandi. Eksperimental ravishda o'rganilgan kvazi-nuklon o'zaro ta'sirlarida fotoemulsiyadagi birlamchi protonlarni "yo'l bo'ylab" skanerlashning yetarli samaradorligi yo'qligi sababli, past ko'plamchilikli hodisalarning yo'qligi kuzatiladi. Tahlil shuni ko'rsatadiki, bunday skanerlash nishon nuklonining oz miqdordagi zaryadlangan zarrachalarga diffraktiv dissotsiatsiyasi bilan bog'liq hodisalarni o'tkazib yuborishi mumkin.

Kalit so'zlar: proton, neytron, kvazi-nuklon o'zaro ta'sirlari, fotografik emulsiya, ko'plamchilik, model, kogerent reaksiyalar, diffraksion dissotsiatsiya, samaradorlik, nishon.

QUASI-NUCLEON INTERACTIONS IN NUCLEAR PHOTOEMULSION

Abstract. The importance of studying nucleon-nucleon interactions for the construction of modern theoretical models is justified. Criteria for selection of quasi-slope (pN) interactions in photoemulsion are described.

It has been shown that in quasi-slope interactions, the energy dependence of mean multiplicities is well described by conventional parameterizations, including the logarithm of energy. In the entire area of primary energies under consideration, the differences of the average multiplicities $ppEm$ and $pnEm$, which are practically independent of the collision energy, are investigated, being approximately equal to 0.6 ± 0.1 . The reason for this phenomenon is explained, due to the fact that the failure to take into account coherent reactions underestimates the average multiplicity in odd-beam events, and the contribution of coherent reactions increases with the interaction energy.

It is concluded that nuclear effects markedly affect the characteristics of quasi-slope collisions in the emulsion, which suggests that the selected interactions contain some admixture of nuclear (multi-slope) interactions of primary protons.

Experimental data were compared with predictions of Lund model for free pN-impacts. In the quasi-slope interactions considered in the experiment, there is a lack of events with small multiplicities associated with insufficiently high efficiency of viewing "along the trace" of primary protons in the photoemulsion. As the analysis shows, with such a view, events associated with diffraction dissociation of the target nucleon into a small number of charged particles can be skipped.

Keywords: proton, neutron, quasi-slope interactions, photoemulsion, multiplicity, model, coherent reactions, diffraction dissociation, efficiency, target.

Введение. Одной из фундаментальных проблем физики атомного ядра и элементарных частиц является экспериментальное и теоретическое исследование свойств сильного взаимодействия.

Столкновение адронов принято описывать как взаимодействие составляющих их кварков и глюонов, приводящее к рождению новых кварков и глюонов с последующей их адронизацией. В результате адронизации образуются кластеры (резонансные и более высокие возбуждения адронов), которые затем превращаются в реальные адроны. Таким образом, изучение явления кластеризации в адронных процессах множественного рождения тесно связано как с проблемой кварк-глюонной структуры адронов, так и с динамикой сильных взаимодействий. Изучение процессов взаимодействия адронов с ядрами является эффективным методом исследования составной структуры адронов. Одновременное исследование множественной генерации частиц в столкновениях адрон-адрон для протонов и пионов в широком интервале энергий и атомных ядер позволяет получить уникальную информацию о неупругих процессах в элементарном акте и о структуре адронов и таким образом, получить информацию о свойствах сильного взаимодействия. Результаты исследования кластеризации в неупругих адронных процессах и его связи со структурой адронов, являются существенными для дальнейшего развития теоретических моделей и создания теории сильных взаимодействий.

Экспериментальный материал. В настоящей работе использованы фотоэмульсионные стопки, облученные протонами с импульсами 20,8 ГэВ/с и 800 ГэВ/с. Стопка облученная протонами 20,8 ГэВ/с находилась в сильном магнитном поле напряженностью $H = 18$ Тл. Это дало возможность идентификации вторичных частиц и отбора событий с помощью импульсных и ионизационных измерений.

Просмотр эмульсий при всех p_0 проводился методом ускоренного просмотра по следу [1], скорость его полностью исключала какую-либо дискриминацию событий по числу сильноионизирующих частиц. Эффективность просмотра контролировалась путем многократного прослеживания части треков первичных частиц при разных скоростях и оказалась очень высокой (~100% для изучаемых взаимодействий).

В таблице 1 приведены характеристики использованных в данной работе взаимодействий.

Таблица 1.

Характеристики взаимодействий

P_0 , ГэВ/с	Уско ритель	Тип эмульсии	Про- смотр, м	Число взд.	Изм. hA - взд.	Изм. hN - взд.	Лит.
------------------	----------------	-----------------	------------------	---------------	---------------------	---------------------	------

20,8	ЦЕРН	Илфорд K5	3550	9570	722	694	[1]
800	FNAL	ГосПр-БР-2	2584	7578	1804	1329	[1]

При просмотре в качестве неупругих взаимодействий регистрировались все события, кроме:

– случаев отклонения прослеживаемого трека на угол $\theta < \theta_{el}$ (θ_{el} -угол, соответствующий условной верхней границе упругого рассеяния протона на нуклонах и ядрах); из двухлучевых событий также выделялись упругие звезды с помощью критерия «угол-угол» и компланарности;

– случая испускания δ -электрона;

– случая электромагнитного образования e^+e^- -пар частицей первичного пучка.

В каждом событии определялись:

1) число всех заряженных частиц с их разделением на s-, g- и b-частицы в соответствии с обычной эмульсионной классификацией:

– релятивистскими или s-частицами считались частицы с относительной ионизацией в эмульсии $I < 1,41 I_0$ (I_0 ионизация пучковых частиц) и скоростью $\beta = v/c > 0,7$; они состоят в основном из частиц, рожденных в процессе соударения (π -мезоны);

– «серыми», или g-частицами, считались частицы с $I > 1,41 I_0$, что соответствует протонам с импульсом $0,2 < p < 1,0$ ГэВ/с и с пробегом в эмульсии $l > 3$ мм; они состоят, в основном, из протонов, выбитых из ядра мишени в процессе соударения; примесь «серых» пионов (импульс $60 < p < 170$ МэВ/с) весьма незначительна [2];

– «черными», или b-частицами, считались частицы с пробегом $l < 3$ мм – в большинстве протоны с импульсом $p < 0,2$ ГэВ/с и более тяжелые осколки ядра-мишени; основная часть этих наиболее медленных вторичных частиц испускается ядром в процессе снятия ядерного возбуждения через большое (в ядерных масштабах) время после взаимодействия. Серые и черные частицы в совокупности называются сильноионизирующими или h-частицами и их множественность $n_h = n_g + n_b$;

2) пространственные (θ) и азимутальные (ϕ) углы вылета всех заряженных частиц.

Квазинуклонными соударениями называются события, удовлетворяющие необходимым критериям отбора взаимодействий первичных протонов со свободным водородом и квазисвободными нуклонами (протонами и нейтронами) ядер фотоэмульсии. Критерии отбора квазинуклонных (pN) взаимодействий в фотоэмульсии следующие [3]:

- 1) наличие не более одной сильноионизирующей частицы в звезде;
- 2) сильноионизирующая частица должна иметь угол $\Theta < \pi/2$ в л.с. и оставлять след, подобный следу протона отдачи с кинетической энергией больше 25 МэВ;
- 3) отсутствие в звезде ядра отдачи, а для событий с четным числом вторичных частиц (pp-соударения) и β -электрона;
- 4) нижняя граница массы мишени $m_t^{\min}$ не должна превышать массу нуклона [4].

Сведения о числе неупругих событий, удовлетворяющих вышеперечисленным критериям отбора pN-взаимодействий, приведены в таблице 1. Для сравнения с данными, полученными нами при 21 и 800 ГэВ, мы использовали также результаты работ [5, 6, 7] при энергиях (20–400) ГэВ. Известно, что среди отобранных нечетнолучевых взаимодействий, кроме соударений протонов с квазисвободными нейтронами ядер эмульсии (pp-соударения), имеются также когерентные протон-ядерные взаимодействия. Рассматриваемые в настоящей главе pp-взаимодействия очищены от вклада когерентных реакций; неопределенности в отборе когерентных реакций малы и практически не сказываются на характеристиках pp-соударений.

Для сравнения с экспериментальными данными мы использовали лундскую модель FRIT1OF-1. Теоретические расчеты были выполнены методом Монте-Карло; полученные по модели pp-, rp- и pA-соударения (статистика – по 5000 звезд для каждого типа взаимодействий) при энергии 800 ГэВ анализировались с учетом экспериментальных критериев и ограничений. При изучении псевдобыстротных распределений, корреляционных зависимостей и флуктуаций плотности проводилось также сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов по Дуальной партонной модели (DPM), монте-карловская версия которой разработана в ОИЯИ [8]. По этой модели было приготовлено около 2000 событий.

Полученные результаты. Множественности вторичных заряженных частиц. На рис. 1а представлена энергетическая зависимость средних множественностей заряженных частиц в квазинуклонных взаимодействиях в фотоэмульсии [9]. Для сравнения приведены данные, полученные для pp-соударений в камерных экспериментах [10–11].

На рис. 16 показаны разности $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} - \langle n_{ch} \rangle_{pnEm}$ для квазинуклонных взаимодействий и $\langle n_{chppEm} \rangle - \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$. Рассмотрение этих данных позволяет сделать следующие выводы:

1. В квазинуклонных взаимодействиях энергетическая зависимость $\langle n_{ch} \rangle$ хорошо описывается обычными параметризациями, включающими в себя логарифм энергии, так, при аппроксимации данных рис. 1а можно получить

$$\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} = 1,13 + 0,62 \ln E + 0,15 \ln^2 E, \quad (1)$$

$$\langle n_{ch} \rangle_{pnEm} = -0,89 + 1,24 \ln E + 0,09 \ln^2 E. \quad (2)$$

2. Во всей рассматриваемой на рис. 1 области первичных энергий $E = (20 \div 800)$ ГэВ имеем $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} > \langle n_{ch} \rangle_{pnEm}$ и разность $\langle n_{ch} \rangle_{pp-} - \langle n_{ch} \rangle_{pn}$ практически не зависит от энергии соударения, будучи приблизительно равной $(0,6 \pm 0,1)$. Ранее [5] уже отмечалось, что эта разность возрастает, и более того, становится зависящей от первичной энергии, если в нечетнолучевых квазинуклонных взаимодействиях не вычтен вклад когерентных реакций. Это связано с тем, что неучет когерентных реакций занижает $\langle n_{ch} \rangle$ в нечетнолучевых событиях, а вклад когерентных реакций, как известно [14], возрастает с энергией взаимодействия.

3. В квазинуклонных pp-соударениях $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} > \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$ при всех рассматриваемых нами энергиях, причем величина разности $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} - \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$ приблизительно логарифмически возрастает с энергией взаимодействия. Эти наблюдения говорят о том, что ядерные эффекты заметным образом сказываются на характеристиках квазинуклонных соударений в эмульсии; естественно предположить, что отобранные нами взаимодействия содержат некоторую примесь ядерных (многонуклонных) взаимодействий первичных протонов, поэтому вопрос о том, насколько

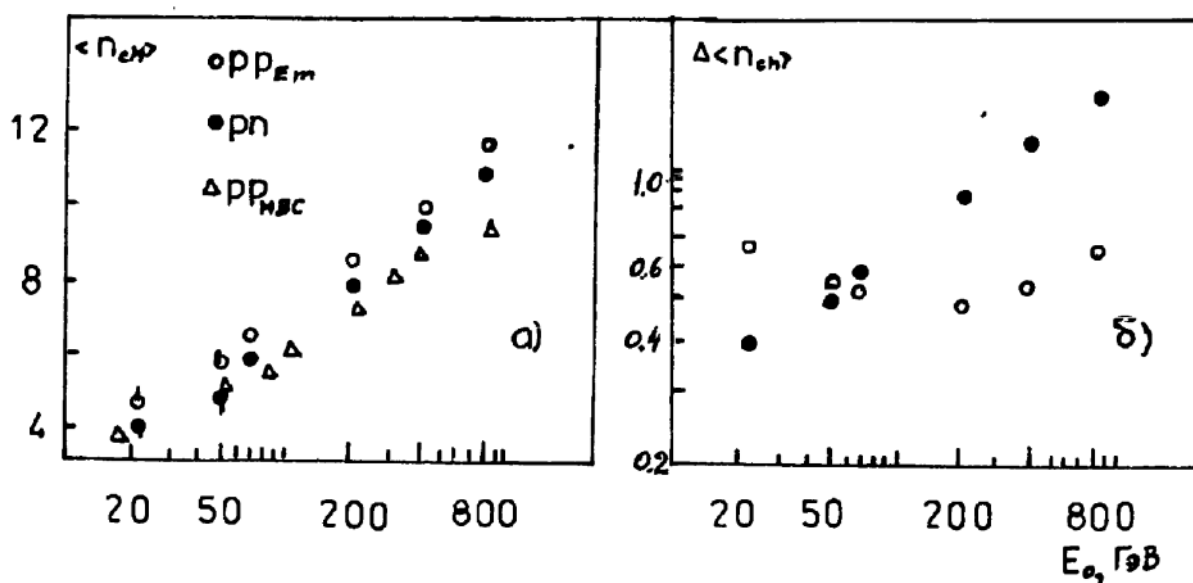


Рис. 1. а) энергетическая зависимость средних множественностей в рN-соударениях, б) разности $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} - \langle n_{ch} \rangle_{pnEm}$ (○) и $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} - \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$ (●)

близки характеристики квазинуклонных pp-соударений и характеристики элементарного акта pp-взаимодействий должен решаться крайне осторожно. Очевидно, что это же справедливо и для квазинуклонных рп-взаимодействий, т.е. отобранные нами рп-соударения очевидно также содержат определенную примесь многонуклонных взаимодействий.

Если для упрощения предположить, что рассматриваемые нами квазинуклонные взаимодействия содержат постоянную примесь α рА взаимодействий, и это является единственной причиной превышения $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm}$ над $\langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$, тогда можно написать

$$\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} = \alpha \langle n_{ch} \rangle_{pA} + (1 - \alpha) \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}. \quad (3)$$

Зная средние множественности заряженных частиц в рА-взаимодействиях в эмульсии, и соответствующие значения $\langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$ (см. [10–13] и ссылки в них), из данных рис. 1 можно

количественно определить значение параметра α , которое в пределах ошибок опыта оказывается независящим от E в рассматриваемой области энергий $\alpha = 0,15 \pm 0,02$. Таким образом, доля «истинных» pp-соударений среди квазинуклонных pp-взаимодействий в эмульсии оказывается довольно высокой. Более того, следует иметь в виду, что полученная нами оценка α представляет собой верхнюю границу вклада некогерентных pA-взаимодействий в квазинуклонные, т.к. не учитывался возможный пропуск малолучевых квазинуклонных событий при просмотре фотоэмульсий «вдоль следа», который также приводит к соотношению $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} > \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$. С другой стороны известно [15], что при рассматриваемых нами энергиях средняя множественность заряженных частиц в pA-взаимодействии увеличивается с ростом E быстрее, чем в pp-соударениях. Это означает, что величина разности $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} - \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$ будет возрастать с увеличением энергии. Действительно, записывая (3) в несколько ином виде, легко убедиться, что как величина отношения $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} / \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$, так и величина разности $\langle n_{ch} \rangle_{ppEm} - \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$ будут возрастать с E при постоянном α , если при этом возрастает отношение $\langle n_{ch} \rangle_{pA} / \langle n_{ch} \rangle_{ppHBC}$.

На рис. 2а представлено распределение по множественности релятивистских заряженных частиц в рассматриваемых нами pN-взаимодействиих, а на рис. 2б это же распределение построено в КНО переменных. Для сравнения с данными по модели FRITIOF-1 были получены две группы событий – в первом случае моделировались взаимодействия 800 ГэВ протонов со свободными протонами и нейтронами в соотношении, которое бралось из эксперимента, во втором случае учитывался 15-процентный вклад pA-взаимодействий в рассматриваемые нами квазинуклонные события; распределения по множественности в этих группах, которые далее будут называться версией 1 и версией 2 лундской модели, показаны на рис. 2 штриховой и сплошной кривыми соответственно. Из рис. 2 видно, что по сравнению с предсказаниями лундской модели для свободных pN-соударений (версия 1), в рассматриваемых на опыте квазинуклонных взаимодействиях наблюдается недостаток событий с малыми множественностями, связанный с недостаточно высокой эффективностью просмотра «вдоль следа» первичных протонов в фотоэмульсии – как показывает анализ, при таком просмотре могут пропускаться события, связанные с дифракционной диссоциацией нуклона-мишени на небольшое число заряженных частиц. В это же время соударения в эмульсии, как видно из рис. 2, обогащены событиями с большими множественностями, вклад в которые очевидно дают и обсуждавшиеся выше многонуклонные соударения падающих протонов с ядрами эмульсии. Это приводит в совокупности к тому, что средние множественности релятивистских частиц на эксперименте, равные соответственно

$$\begin{aligned} \langle n_{ch} \rangle_{ppEm} &= 11,67 \pm 0,24, & \langle n_{ch} \rangle_{pnEm} &= 11,29 \pm 0,23, \\ \langle n_{ch} \rangle_{pNEm} &= 11,50 \pm 0,15, \end{aligned} \quad (4)$$

оказываются значительно больше расчетных значений, полученных по лундской модели (версия 1).

$$\langle n_s \rangle_{pp} = 9,72, \quad \langle n_s \rangle_{pn} = 9,42, \quad \langle n_s \rangle_{pN} = 9,55. \quad (5)$$

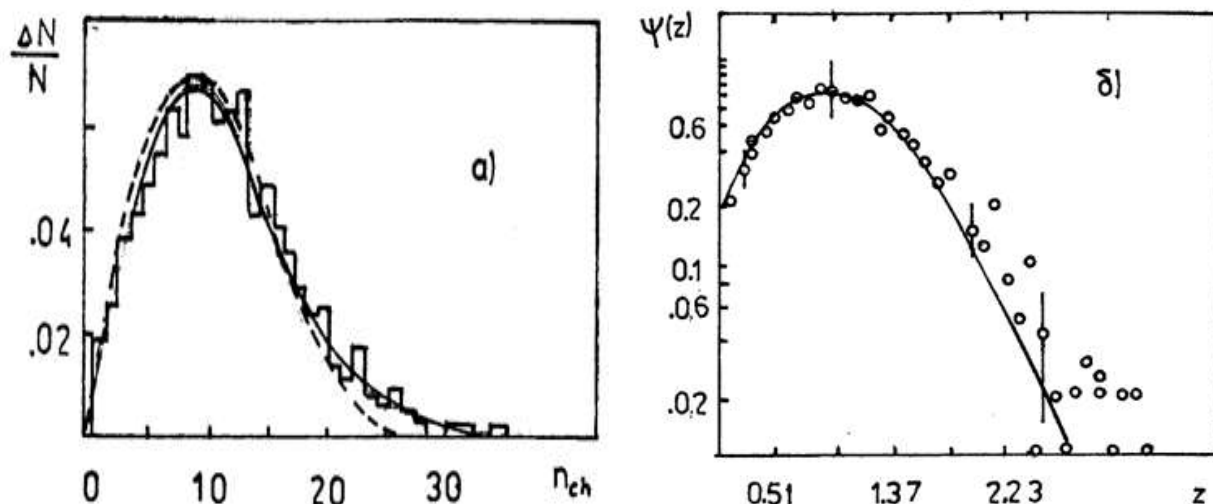


Рис. 2. Распределение по множественности релятивистских заряженных частиц

С другой стороны, если в расчете по лундской модели учесть вклад некогерентных рА-взаимодействий (версия 2), согласие с экспериментальными данными улучшается $\langle n_s \rangle = 11,55$; из рис. 2а видно, что в этом случае удастся воспроизвести хвост n_s -распределений, действительно связанный с вкладом многонуклонных соударений первичных протонов.

Наконец отметим, что n_s -распределения в квазинуклонных взаимодействиях при 800 ГэВ удовлетворяют приближенному КНО-скейлингу и хорошо описываются КНО-функцией

$$\Phi(z) = (3,79z + 33,7z^3 - 6,64z^5 + 0,332z^7) \exp(-3,04z), \quad (6)$$

параметры которой были определены в [16] для распределений множественности заряженных частиц в pp-соударениях в широкой области первичных энергий. Это обстоятельство подтверждает еще раз неоднократно отмечавшийся факт слабой чувствительности формы КНО-функции к массе мишени, поскольку как мы определили выше, рассматриваемые квазинуклонные соударения содержат заметную долю рА-взаимодействий.

Угловые распределения и их характеристики. Для обсуждения угловых распределений заряженных частиц мы использовали псевдобыстроту $\eta = -\ln \tan \Theta/2$, Θ -полярный угол вылета частицы в л.с.к. Инклюзивные η -распределения заряженных и ливневых частиц в pp- и pn-взаимодействиях сравнивались, как и ранее, с двумя версиями расчета по лундской модели (рис. 3). Данные о средних значениях и дисперсиях этих распределений приведены в таблице 2.

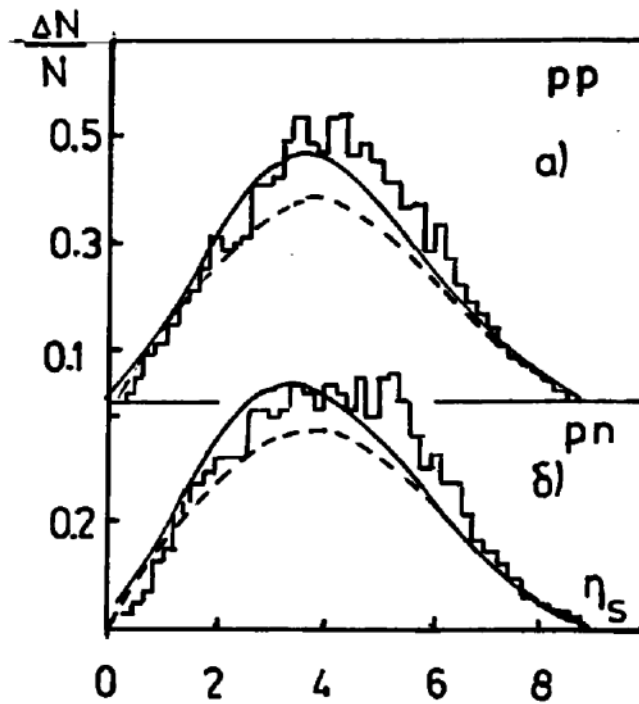


Рис. 3. Инклюзивные η – распределения релятивистских частиц в pp-(а) и pn-соударениях – (б). Кривые – расчет по лундской модели (штриховая – версия 1, сплошная – версия 2)

Таблица 2

Средние значения и стандарты η -распределений в рN-соударениях при 800 ГэВ.

	pp		pn	
	η	$\sigma(\eta)$	η	$\sigma(\eta)$
эксп.(для s)	$4,15 \pm 0,02$	$1,73 \pm 0,02$	$4,44 \pm 0,01$	$1,83 \pm 0,01$
версия 1	$4,18 \pm 0,01$	$1,94 \pm 0,01$	$4,08 \pm 0,01$	$1,85 \pm 0,01$
версия 2	$4,01 \pm 0,01$	$1,88 \pm 0,01$	$3,97 \pm 0,01$	$1,84 \pm 0,01$
эксп.(для ch)	$4,09 \pm 0,02$	$1,77 \pm 0,02$	$3,94 \pm 0,03$	$2,09 \pm 0,02$
версия 1	$4,07 \pm 0,01$	$1,99 \pm 0,01$	$3,97 \pm 0,01$	$1,91 \pm 0,01$
версия 2	$3,92 \pm 0,01$	$1,93 \pm 0,01$	$3,90 \pm 0,01$	$1,90 \pm 0,01$

Выводы. Рассмотрение этих данных позволяют сделать следующие выводы:

1) угловые распределения заряженных и релятивистских частиц асимметричны относительно величины $\eta = \text{Arch} \gamma_c = 3,72$, соответствующей скорости системы центра масс pp-соударения при 800 ГэВ. Эта асимметрия наблюдается и для теоретических распределений и очевидно обусловлена неточностью так называемого ультрарелятивистского приближения и вкладом релятивистских протонов. Как и при более низких энергиях, асимметрия угловых распределений выражена несколько сильнее для pp-, чем для pp-соударений, что обусловлено зарядом мишени (рис.3) – так, если рассмотреть разность инклюзивных распределений

$$\Delta(\eta) = (d\sigma / \sigma d\eta)_{pp} - (d\sigma / \sigma d\eta)_{pn}, \quad (7)$$

для pp- и pn-соударений, она будет положительна в задней полусфере, тогда как в передней полусфере в пределах ошибок опыта $\Delta(\eta) = 0$.

2) результаты теоретических расчетов, выполненных по модели Лунда неудовлетворительно описывают экспериментальные данные по угловым распределениям релятивистских и заряженных частиц в квазинуклонных взаимодействиях. Так, во второй версии расчета, описывающей экспериментальные данные по множественности в квазинуклонных взаимодействиях, средние значения псевдобыстроты $\langle \eta \rangle$ оказываются меньше, а стандарты η -распределений $\sigma(\eta)$ – несколько больше, чем на эксперименте (таблица 2). Важно подчеркнуть, что теоретические кривые переоценивают $d\sigma/\sigma d\eta$ в задней полусфере – в области фрагментации мишени (т.е. в области малых η) и недооценивают их в передней полусфере.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Саидханов Н.Ш. Неупругие взаимодействия протонов и ядер с нуклонами и ядрами при высоких и сверхвысоких энергиях. Изд-во «Фан» АН РУз. Ташкент, 2021г., 214 стр.
2. Saidkhanov N.Sh., Application of least squares method for particle identification and sampling events in photoemulsion. Mental enlightenment scientific methodological journal. V5 No.03, 2024. 178-187. DOI:<https://doi.org/10.37547/mesmj-V5-I3-26Pages>: 178-186. <http://mentaljournal-jspu.uz/index.php/mesmj/index178>.
3. Граменицкий И. М. Работы на пузырьковых водородных и ксеноновой камерах. Дубна : ОИЯИ, 2003. — с. 205—206.
4. Биргер Н. Г., Смородин Ю.А. О кинематике элементарных взаимодействий. // ЖЭТФ. -1959. - т. 36. -С. 1159-1167.
5. Боос Э.Г., Азимов С.А. и др. Исследование квазинуклонных взаимодействий протонов с $P_0=400$ ГэВ/с в ядерной фотоэмульсии. // Ядерная физика. -1979. -т. 30. -С. 407-414.
6. Азимов С.А. и др. Общие характеристики неупругих pN-соударений при энергии 50 ГэВ в фотоэмульсии. // Изв. АН УзССР. -1973. -М. -С. 69-75.
7. Азимов С.А. и др. Исследование pN-взаимодействий при $E=21$ ГэВ методом фотоэмульсий в сильном магнитном поле. // Известия АН СССР, серия физическая. -1970. -т. 34. -С.1912-1916.
8. Shmakov S.Y., Uzhinski V.V. New realisation of Dual parton model. // Proc. of the Intern. Conf. hadron structure-87 held of Smolenice. -Praha, 1987. -P.85-94.
9. Абдужамиллов Ш., Саидханов Н.Ш. и др. Квазинуклонные взаимодействия 800 ГэВ протонов в ядерной фотоэмульсии. // Препринт ФТИ НПО «Физика-Солнце». -Ташкент, 1990. -№1,28-90-ФВЭ.
10. Ammar R. e.a.Multiplicity of charged particles in 800 GeV pp-interactions. //Physics Letters. -1986. -v.178B. -P.124-128.
11. Albin E. Mean charged hadron multiplicities in high energy collisions. // Nuevo Cimento. -1976. -v.32A. -P.102-113.
12. Thome W. e.a. Charged particle multiplicity distributions in pp-collisions at ISR energies. // Nuclear Physics. -1977. -v.B129. -P.365- 389.
13. Bromberg C.e.a. Cross section and charged-particle multiplicities at 102 and 400 GeV/c. // Physical Review Letters.-1973. -V.31. -C.1563-1566.
14. Abdushamilov A., Saidkhanov N.Sh. e.a.Coherent production of particles in emulsion nuclei. // Modern Physics Letters. -1988. -V.A3 -P.489-495.

PHYSICS

15. Abdurazakova Y. A., Saidkhanov N.Sh.e.a. *Interactions of the 800 GeV protons from fermilab with the emulsion nuclei. // Acta Physic Polonica. -1987. -v.B18. -P.249-256.'*
16. Slattery P. *Evidence for the systematic behavior of charged prong multiplicity distributions in high energy proton-proton collisions. // Physical Review. -1973. -v.D7. -P.2073-2079.*

SPECTRUM OF VARIATIONS OF COSMIC RAYS IN THE EARTH'S ORBIT ACCORDING TO DATA FROM THE AMS-02 MAGNETIC SPECTROMETER

XamrayevYuldash Burhanovich,

Samarkand State Pedagogical Institute, Samarkand, UR

yu-hamrayev@mail.ru

Victor Gugovich Yanke,

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation of the Russian

Academy of Sciences, Moscow, RF

yanke@izmiran.ru

Abstract. For the first time, based on the experimental data of AMS-02, a three-parameter spectrum of variations of galactic cosmic rays was obtained in the range of rigidity 1- 30 GV, to which neutron monitors are most sensitive. It was found that during the period of negative polarity of the solar magnetic field, a power-law spectrum of variations is observed with a strong exponential decay in the region of high rigidity. When the polarity changes to positive at the beginning of the new 24th solar cycle, the spectrum of cosmic ray variations becomes purely power-law. The transition to the experimentally obtained spectrum of variations will make it possible to remove a number of uncertainties and increase the accuracy of the analysis of data from the ground network of detectors. This will make it possible to retrospectively obtain fluxes of galactic protons with an average monthly resolution for the period of the space era based on ground-based monitoring on a network of neutron monitors.

Keywords: long-term variations, AMS-02, spectrum of variations, ground-based detectors.

СПЕКТР ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ МАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА AMS-02

Аннотация. Впервые на основе экспериментальных данных AMS-02 был получен трёхпараметрический спектр вариаций галактических космических лучей в диапазоне жёсткости 1–30 ГВ, к которому наиболее чувствительны нейтронные мониторы. Установлено, что в период отрицательной полярности солнечного магнитного поля наблюдается степенной спектр вариаций с сильным экспоненциальным спадом в области высоких жёсткостей. При смене полярности на положительную в начале нового 24-го солнечного цикла спектр вариаций космических лучей становится чисто степенным. Переход к экспериментально полученному спектру вариаций позволит устранить ряд неопределённостей и повысить точность анализа данных наземной сети детекторов. Это даст возможность ретроспективно получить потоки галактических протонов со среднемесячным разрешением за период космической эры на основе наземного мониторинга сетью нейтронных мониторов.

Ключевые слова: долговременные вариации, AMS-02, спектр вариаций, наземные детекторы.

YER ORBITASIDA KOSMIK NURLAR O'ZGARISHLARI SPEKTRI AMS-02 MAGNIT SPEKTROMETRI MA'LUMOTLARIGA KO'RA

Annotatsiya. Birinchi marta AMS-02 eksperimental ma'lumotlari asosida 1–30 GV qattqlik diapazonida galaktik kosmik nurlar variatsiyalarining uch parametrli spektri olindi; aynan shu diapazonga neytron monitorlari eng sezgir hisoblanadi. Aniqlanishicha, Quyosh magnit maydonining manfiy qutblanishi davrida yuqori qattqlik sohasida kuchli eksponensial kamayish bilan tavsiflangan darajali (power-law) spektr kuzatiladi. Yangi 24-quyosh siklining boshida qutblanish musbatga o'zgarganda, kosmik nurlar variatsiyasi spektri sof darajali ko'rinishga o'tadi. Eksperimental ravishda olingan variatsiya spektriga o'tish bir qator noaniqliklarni bartaraf etish va yer usti detektorlar tarmog'i ma'lumotlarini tahlil qilish aniqligini oshirish imkonini beradi. Bu esa neytron monitorlari tarmog'i asosidagi yer usti monitoringi orqali kosmik davr mobaynida galaktik proton oqimlarini o'rtacha oylik aniqlik bilan retrospektiv tarzda aniqlash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: uzoq muddatli variatsiyalar, AMS-02, variatsiya spektri, yer usti detektorlari.

Introduction. Despite the significant progress achieved in recent decades, the physical mechanisms underlying the modulation of galactic cosmic rays in the heliosphere still the subject of discussion. The complex process of particle transfer creates problems for the development of a universal picture of long-term variations in galactic cosmic rays, which covers a long observational period (on the order of 70 years) of continuous monitoring of cosmic radiation.

Experimental data on flux variations over the period from the mid-1950s to the present could be obtained with good accuracy only from continuous ground-based measurements on a network of cosmic ray detectors. The need to analyze the results of such long-term ground monitoring led to the creation of special methods. One of the earliest and most successful implementations of the global method was created in Yakutsk (Krymsky et al., 1966) and was named the “Global Spectrographic Method” (GSM), since the calculations used data from a network of detectors distributed across the globe. Around the same time, Japanese researchers proposed their methodology (Nagashima, 1971). In essence, in all variants this is a method of spherical analysis, where the expansion of the function of cosmic ray variations in spherical harmonics is used. But this takes into account cascade processes in the atmosphere and the movement of particles in the Earth's magnetosphere. With this in mind, we can say that GSM is essentially a sophisticated version of spherical analysis. IZMIRAN has created its own version of GSM (Belov et al., 1983; 1998), which has been used for many years for a detailed and comprehensive study of variations in cosmic rays of the zero harmonic (isotropic component of cosmic ray variations), the first spherical harmonic, and sometimes the second harmonic of cosmic ray variations.

In the simplest case, the problem is reduced to solving a system of equations describing the cosmic ray variations at each point and obtaining the parameters of the isotropic component variation.

Directly observed variations in the count rate of the i -th cosmic ray detector (where N_B is the base count rate relative to which the variations are calculated) can be represented as

$$v_i = \int_{R_c^i}^{\infty} W^i(R, R_c^i, h_0^i) \cdot \frac{\delta J}{J}(R) \cdot dR + \sigma^i. \quad (1)$$

Here $W^i(R, R_c^i, h_0^i)$ is a coupling function between primary cosmic ray and variations of the secondary cosmic ray registered by detector i located in the point with geomagnetic cut off rigidity R_c^i on the atmospheric depth h_0 . The spectrum of the primary cosmic radiation and the desired spectrum of the isotropic variation are designated, respectively, as $J(R)$ and $\delta J/J(R)$. The discrepancy σ^i reflects the inadequacy of the used model of variations and possible hardware variations.

The coupling functions determine the influence of the Earth's atmosphere, and the magnetosphere effect takes into account the rigidity of the geomagnetic cutoff of the considered detector. The coupling functions of the neutron component were calculated by us (Aleksanyan et al., 1982), the coupling functions of the muon component were used from Fujimoto et al. (1976).

An important situation is when the analytical form of the desired solution is known, or the solution can be approximated with a high degree of reliability by a model built on the basis of a priori information. In this case, as a rule, the corresponding system of equations for finding a small number of unknown parameters turns out to be well conditioned. The advantage of this situation is that it is practically impossible to obtain an absurd solution if the analytical model is chosen in accordance with the process under study.

The objective of this work is to establish the analytical form of the spectrum of variation with a minimum number of parameters for use in analyzing data from the global network of ground-based cosmic ray detectors using the AMS-02 experimental data on the spectrum of protons and nuclei in the range of rigidity from several GV to several tens of GV. This will make it possible to abandon the empirically specified spectra of variation.

Data of magnetic spectrometer AMS-02. High-precision data of the orbital detector of cosmic rays AMS-02 for the study of dark matter and antimatter also provide a unique opportunity to measure spectral characteristics at moderate and high rigidity of the particles.

Direct measurements of galactic cosmic rays in the range of rigidities from one to several tens of GV were carried out on the PAMELA (Adriani et al., 2017) and AMS-02 (Ting et al., 2013) spacecraft. The statistical accuracy of the data of the AMS-02 magnetic spectrometer is significantly higher, since the geometric factor of the AMS-02 is about $0.5 \text{ m}^2 \text{ sr}$, and the PAMELA spectrometer is only $21.5 \text{ cm}^2 \text{ sr}$. This work was based on the data of the AMS-02 magnetic spectrometer.

AMS-02 (Aguilar et al., 2015; 2018) is a magnetic spectrometer operating onboard the *International Space Station* from 2011 to the present. The digital data is available in the database (CRDB, 2020). A

description of the database can be found in DiFelice et al. (2017). Sampling by rigidity or by time (t , R) is possible with fixing one of the parameters. For a given moment in time, proton spectra can be obtained in a very wide range of rigidities. In this work, we limited ourselves to the particle rigidity in the range 1 - 30 GV, to which the network of ground-based neutron monitors is most sensitive.

Ground methods. In Belov et al. (1998) a variant of the global spectrographic method is described specially adapted for studying the long-term behavior of isotropic CR variations. The analysis is carried out using the monthly average data of neutron monitors (about 45 detectors), muon telescopes, and stratospheric sounding. In the simplest case of isotropic variations the problem is reduced to solving the system of equations (1). In the model, it was assumed that the spectrum of variations is given in a three-parameter empirical form and is defined as:

$$\delta J / J(R) = a_1 / (R_L + R)^\gamma. \quad (2)$$

Area of the parameter changes: $\gamma = 1 \div 2$ and $R_L = (0 \div 4)$ GV. A three-parameter approximation of the galactic CR variation spectrum is suitable for describing the spectrum of long-term variations in the 5-50 GV regions.

Figure 1 shows the parameters of the spectrum of variations in galactic CR: a_{10} , R_L and γ , obtained by this method. The bottom panel shows the standard deviations of the experimental data from the model, which makes it possible to assess the adequacy of the applied variation model.

The spectrum of variations in the form (2) was chosen empirically, but other options were also considered. A direct experimental verification of the shape of the spectrum of variations in the range of rigidity from one to several tens of GV has never been carried out, since the maximum rigidity of particles in measurements of fluxes outside the magnetosphere at best reached 2 GV. Direct measurements in a wide range of rigidities using unique magnetic spectrometers will solve this problem.

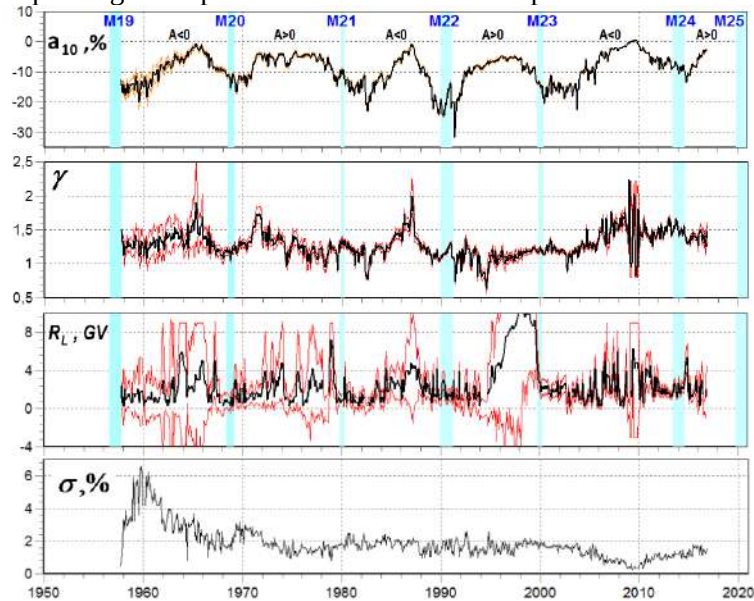


Figure 1. Parameters of the galactic cosmic rays variation spectrum: a_{10} , R_L and γ the model discrepancy is shown at the bottom. The error range is shown in red

Method of experimental determination of the spectrum of variations. To experimentally determine the spectrum of GCR variations, we used data from the AMS-02 magnetic spectrometer for the entire period of its operation. The time course of AMS-02 flux variations relative to the 2009 base period and their comparison with the GSM results are shown in the top panel of Fig. 2. The period of the polarity reversal of the Sun magnetic field from the second half of 2013 to the first half of 2014 is also highlighted here (Sun, 2015). But above all, the measured flux was freed from the contribution of solar cosmic rays.

For this, the periods of solar events were excluded from the analysis: 13 SPE, including 6 GLEs. The selection criterion for the events was the excess of the proton flux > 100 MeV threshold of 1 pfu (graphical data can be found on the website (SWPC, 2020)).

Analysis shows that the contribution ($< 10^{-40}\%$) of solar cosmic rays can be neglected by considering the averaged galactic CR flux per Carrington revolution. In fig. 2 (top left panel), the SPE and GLE moments

during the AMS-02 operation period are marked with vertical segments, the length of which is proportional to the effect.

The result of the analysis in Fig. 2 is shown for the period of negative polarity (left) and positive polarity (right) of the Sun magnetic field, and the time point is marked with a vertical line in the upper panel of the figure.

The middle panel shows the spectrum of particles (protons) J for the considered moment of time and the spectrum of particles J_B for the base period. Due to the lack of data for a later period, January-April 2017 was selected as the base period (horizontal segment on the top panel), although the SA minimum and the maximum count rate are observed in April 2020. The results should be considered as preliminary and should be revised after updating the AMS-02 data.

Changes in the particle spectrum relative to the particle spectrum in the base period determine the spectrum of variations. By definition, the spectrum of variations for each point in time is defined as:

$$v = J / J_B - 1 \quad (3)$$

In the last expression, the variables are functions of time and rigidity, i.e. $v(t, R)$, $J(t, R)$ and $J_B(R)$.

The experimental spectrum of variations, in this way determined, is shown in the lower panel of Fig. 2 (points and errors in their determination) for two polarities of the total magnetic field of the Sun.

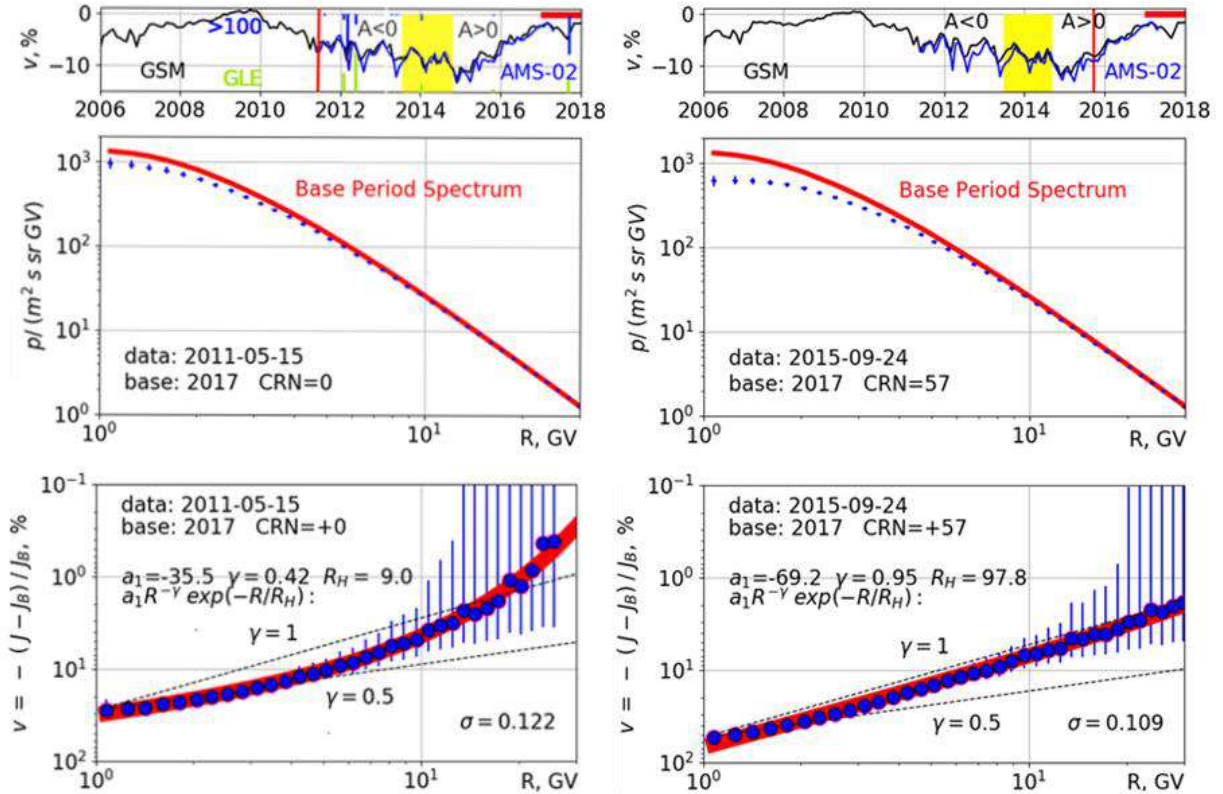


Figure 2. An example of spectra for two points in time: for a period of negative (left) and positive polarity (right) of the total magnetic field of the Sun. The middle panels show the particle spectra (obtained from AMS-02) and the spectra of variations found on their basis, shown in the lower panels

The choice of the approximating function for the spectrum of variation depends on the rigidity range and the problem being solved. Several analytical models of the spectra of cosmic ray variations were considered, including the spectrum of variations of the form (2).

However, the most successful for approximating the experimental spectrum of cosmic ray variations in a wide range of rigidities was the power-law spectrum modulated by an exponential in the region of upper rigidities, i.e.

$$v = a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H), \quad (4)$$

where R_H -upper rigidity. This is the so-called Ellison-Ramaty spectrum (1985). Function (4) is nonlinear with respect to the parameters a_1 , γ and R_H . System (4) can be reduced to linear by taking the logarithm. As a result, we obtain a system of linear equations for the parameters $\ln a_1$, γ and $1/R_H$:

$$\ln v_i = \ln a_1 - \gamma \ln(R_i) - R_i / R_H \quad (5)$$

The parameters of approximation a_1 , γ и R_H for two time moments with positive and negative polarity of the total magnetic field of the Sun also presented at the bottom panels in Fig.2. More common model:

$$v = a_1(R_L + R)^{-\gamma} \exp(-R/R_H) \quad (6)$$

In the region of lower rigidities v is also controlled by a parameter, but the model has not yet been considered, since it remains nonlinear even after the logarithm procedure.

In the work (Liu et al., 2020), a five-parameter model is proposed that better approximates the spectrum of cosmic ray variations over a wide range of rigidities, but which is not linearizable and is therefore inconvenient for practical use.

Discussion of the results. The parameters of approximation a_1 , γ , and R_H in the considered model (4) were obtained for each solar rotation since May 2011. In the period of negative polarity of the solar magnetic field ($A < 0$) before the polarity reversal, the parameter R_H is close to 10 GV, and during this period, a power-law spectrum of galactic CR variations with strong exponential decay in the areas of rigidity > 30 GV is observed. With a change in polarity and at the beginning of a new 24th solar cycle, the parameter R_H becomes close to 100 GV, and the spectrum turns into a purely power-law spectrum.

During periods of positive magnetic polarity, particles enter the heliosphere from the polar regions, drift toward the equator, and leave the heliosphere along the neutral current sheet. The detector is located near the Sun. When drifting from the pole to the equator, particles lose energy corresponding to the potential difference of the heliosphere Φ . Since the potential Φ weakly depends on the magnetic field disturbance, at the SA minimum the maximum amplitude of the isotropic variation is flat. The intensity of variations is proportional to $\Delta\Phi/R$ (Dolginov, Toptygin, 1979), i.e. the index $\gamma \approx 1$, which is observed. At negative polarity in the weak modulation approximation (i.e. high energies), particles drift from the outer heliosphere along the neutral current sheet and leave the heliosphere through the polar regions. Thus, the modulation of particles is determined only by energy losses during propagation in the equatorial region, determined by the mean free path of the particles. That is, the particle spectrum observed on Earth correlates well with the level of magnetic field disturbance, therefore, at the minimum of SA, the maximum is sharp. For high energies $\lambda \sim p^2$ (Dolginov, Toptygin, 1979) and the index $\gamma \approx 2$. Which is also experimentally observed at a rigidity of ~ 10 GV.

It can be noted that before the solar activity maximum in 2014 and the polarity reversal, the experimentally measured variations on the AMS-02 experiment in some periods are almost twice as large as the variations obtained by the GSM method from the data of ground-based detectors. This coincides with the period of negative polarity $A < 0$ of the solar magnetic field, in the period of positive polarity $A > 0$ after the polarity reversal of the solar magnetic field, this effect is not observed.

Summary and conclusions. Due to its unique capabilities, the satellite experiment AMS-02 for the first time made it possible to obtain an experimental spectrum of cosmic ray variations in the range of rigidities to which the ground-based network of neutron monitors is sensitive. This, in turn, will make it possible to remove the uncertainty in the choice of the spectrum of cosmic ray variations during GSM analysis, since until now the spectrum of cosmic ray variations was determined only empirically.

In this work, based on AMS-02 data, for the first time, the experimental spectrum of cosmic ray variations and its temporal changes in the range of rigidity 1-30 GV for the period from May 2011 to April 2017 are obtained. The found form of the spectrum of variations will make it possible to increase the accuracy of the reconstructed parameters of the spectrum of cosmic ray variations outside the magnetosphere from the data of the network of ground-based cosmic ray detectors.

An important result of this work is the transformation of the form of the spectrum at different periods of polarity of the interplanetary magnetic field. During the period of negative polarity $A < 0$ of the solar magnetic field, a power-law spectrum of variations with a strong exponential decay is observed in the region of upper rigidities.

When the polarity changes $A > 0$ the spectrum of cosmic ray variations transforms into a purely power-law spectrum. In the work for the base period, the data of January-April 2017 were used, but when new data are published, including the minimum SA and the maximum count rate in April 2020, the calculations of the spectrum of variations must be updated.

Acknowledgments: The authors are grateful to the members of the NMDB project (www.nmdb.eu). The work is carried out within the framework of the UNU "Russian National Ground Network of Cosmic Ray Stations" (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536>).

REFERENCES:

1. Adriani O., Barbarino G. C., Bazilevskaya G. A. et al. (PAMELA Collaboration), 2017, "Ten years of PAMELA in space", Riv. Nuovo Cimento **40** 473 <https://doi.org/10.1393/ncr/i2017-10140-x>, *Crossref*, *Google Scholar*
2. Aguilar M. et al. (AMS Collaboration), 2015, Phys. Rev. Lett. **114**, 171103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.171103>
3. Aguilar M. et al. (AMS Collaboration), 2018, Phys. Rev. Lett. **121**, 051101. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.119.251101>
4. Aleksanyan T.M., Belov A.V., Yanke V.G. et al., // Izv. RAS. Ser. Phis. 1982, V. 46, №9, P.1689-1691.
5. Belov A.V., Dorman L.I. and Yanke V.G., 1983, "The simplest versions of the global-spectrographical method". Proc. of 18-th ICRC, Bangalore, Vol. 10, pp. 144-147.
6. Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G., 1998, Geomagnetism and Aeronomy, V.38, No.4, P.131
7. CRDB (Cosmic Ray DataBase), 2020, <https://tools.ssdc.asi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp>, CR Network, 2020.
8. DiFelice Valeria, Pizzolotto Cecilia, D'Urso Domenico, Dari Simonetta, Navarra Daniele, Primavera Roberto, Bertucci Bruna, 2017. "Looking for cosmic ray data? The ASI Cosmic Ray Database" 35th ICRC, PoS 1073, Korea <https://pos.sissa.it/301/1073/pdf>
9. Dolginov A.3., Toptygin I.N. // - M.: Nauka, 1979. - 830 p.
10. Ellison, D. C., Ramaty, R. Shock acceleration of electrons and ions in solar flares. The Astrophysical Journal, V.298:400-408, 1985 November 1. <https://doi.org/10.1086/163623>.
11. Fujimoto K., Murakami k., Kondo I., Nagashima K.// Proc. of ICRS on High Energy Cosmic Ray Modulation. University of Tokyo, Japan, 1976, p.50; Proc 15-th ICRC, Plovdiv, Bulgaria, 1977, V.4, 321-325.
12. Krymskiy G.F., Altukhov A.M., Kuzmin A.I., Krivoshapkin P.A., Skripin G.V., Chirkov N.P., 1966. // Geomagnetism and Aeronomy, V.6., №6, P.991-996.
13. Lafferty G.D., Wyatt T.R., "Where to stick your data points: The treatment of measurements within wide bins" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **355**, 541-547, 1995. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01112-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01112-5).
14. Liu Z., Wang L., Wimmer-Schweingruber R. F., Krucker S., Mason G.M. //JGR, 2020.V.125. e2020JA028702. <https://doi.org/10.1029/2020JA028702>.
15. Nagashima K., 1971 "Rep. of Ionosphere and Space Res. In Japan, Vol. 25, No 3, p. 189.
16. CRDB (Cosmic Ray DataBase), 2020, <https://tools.ssdc.asi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp>, CR Network, 2020.
17. Sun Xudong, Hoeksema J. Todd, Liu Yang, Zhao Junwei, 2015. Astroph. J., 798, 2, id. 114, 8 pp. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/2/114>.
18. SWPC, 2020/ <https://www.swpc.noaa.gov>.

SEMENT KOMPOZITINING EGILUVCHANLIK KO'RSATKICHLARINI YAXSHILASH UCHUN PANJARA VA ICHI BO'SH ARHITEKTURALANGAN POLIMER ARMATURADAN FOYDALANISH

To'lakova Gulchehra Yo'ldosh qizi,

Toshkent davlat arxitektura va qurilish universiteti talabasi

tulakovagulchexra@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqola sement kompozitlarining egilish xususiyatlarini yaxshilash uchun 3D-bosma texnologiyasida ishlab chiqarilgan panjara (lattice) va ichi bo'sh (hollow) arxitekturalangan polimer armaturalardan foydalanish samaradorligini o'rganadi. Tadqiqotda ikki xil armatura sinfi o'zaro solishtirilgan: (1) turli geometrik shakllardagi (Sinusoidal, Hexagonal, Kagome) panjara simon armaturalar va (2) oddiy va iyerarxik ichi bo'sh naychalardan tashkil topgan armaturalar. Uch nuqtali egilish sinovlari natijalari shuni ko'rsatdiki, ikkala turdagi armatura ham armaturalanmagan namunaga nisbatan kompozitning egilishdagi mustahkamligi, qovushqoqligi (toughness) va egiluvchanligini (ductility) sezilarli darajada oshiradi. Ayniqsa, ichi bo'sh armatura turlari panjarasimon turlarga nisbatan yuqori ko'rsatkichlarni namoyon etgan. Mikro-kompyuter tomografiyasi (μ -CT) tahlillari shuni ko'rsatdiki, panjarasimon armaturali kompozitlarda sinish asosan armatura va sement matritsasi chegarasida sodir bo'lsa, ichi bo'sh armaturali kompozitlarda armaturaning o'zi sinadi. Bu esa mustahkamlik va defleksioning ortishiga olib keladi.

Kalit so'zlar: arxitekturalangan armatura, 3D-bosma, sement kompoziti, egiluvchanlik, qovushqoqlik, panjara struktura, ichi bo'sh struktura, biomimetika.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕШЁТЧАТЫХ И ПОЛЫХ АРХИТЕКТУРИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ АРМАТУР ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗГИБА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. В данной статье рассматривается эффективность применения решётчатых (lattice) и полых (hollow) архитектурированных полимерных армирующих элементов, изготовленных с использованием технологии 3D-печати, для улучшения изгибных свойств цементных композитов. В исследовании были сравнены два типа армирования: (1) решётчатые структуры различных геометрических форм (синусоидальные, гексагональные, Kagome) и (2) простые и иерархические полые трубчатые структуры. Результаты трёхточечных испытаний на изгиб показали, что оба типа армирования значительно повышают прочность при изгибе, вязкость разрушения (toughness) и пластичность (ductility) композита по сравнению с неармированными образцами. Особенно высокие показатели продемонстрировали полые структуры по сравнению с решётчатыми. Анализ с использованием микрокомпьютерной томографии (μ -CT) показал, что в композитах с решётчатой арматурой разрушение происходит преимущественно на границе между арматурой и цементной матрицей, тогда как в композитах с полый арматурой разрушение происходит в самой арматуре, что приводит к увеличению прочности и прогиба.

Ключевые слова: архитектурированная арматура, 3D-печать, цементный композит, изгиб, пластичность, вязкость разрушения, решётчатая структура, полая структура, биомиметика.

USE OF LATTICE AND HOLLOW ARCHITECTURED POLYMER REINFORCEMENT TO IMPROVE THE FLEXURAL PERFORMANCE OF CEMENT COMPOSITES

Abstract. This paper investigates the effectiveness of using lattice and hollow architected polymer reinforcements, manufactured via 3D printing technology, to improve the flexural properties of cement composites. Two types of reinforcement were compared in the study: (1) lattice structures with various geometries (sinusoidal, hexagonal, and Kagome) and (2) simple and hierarchical hollow tubular structures. The results of three-point bending tests showed that both types of reinforcement significantly enhance the flexural strength, toughness, and ductility of the composite compared to unreinforced samples. Notably, hollow structures demonstrated superior performance compared to lattice structures. Micro-computed tomography (μ -CT) analysis revealed that in composites reinforced with lattice structures, failure mainly

occurs at the interface between the reinforcement and the cement matrix, whereas in composites with hollow reinforcement, failure occurs within the reinforcement itself, leading to increased strength and deflection.

Keywords: architected reinforcement, 3D printing, cement composite, flexural behavior, toughness, ductility, lattice structure, hollow structure, biomimetics.

Kirish. Sement asosidagi materiallar, xususan, beton, dunyoda eng ko'p qo'llaniladigan qurilish materiali hisoblanadi. Biroq ularning asosiy kamchiligi — past cho'zilish mustahkamligi va mo'rtligidir. Bu kamchiliklarni bartaraf etish uchun beton po'lat armaturalar bilan mustahkamlanadi. Po'lat armatura yuqori mustahkamlikka ega bo'lsa-da, korroziyaga uchrash, og'irlik va murakkab shakllarda ishlab chiqarishning qiyinligi kabi muammolarga ega [1]. Shu sababli, so'nggi yillarda muqobil armatura materiallari va tizimlarini ishlab chiqish bo'yicha ilmiy izlanishlar faollashdi.

Tabiatda ko'plab materiallar (masalan, suyak, bambuk, dengiz chig'anoqlari) murakkab ichki tuzilish (arxitektura) orqali yuqori mustahkamlik va qovushqoqlikka erishadi. Ushbu prinsip asosida arxitekturalangan materiallar (architected materials) deb atalu- vchi yangi sinf materiallar yaratilmoqda. Bu materiallarning geometriyasi ularning mexanik xususiyatlarini belgilaydi. Additiv ishlab chiqarish (3D-bosma) texnologiyalarining rivojlanishi esa bunday murakkab shakllarni yuqori aniqlikda yaratish imkonini berdi [1]. Ushbu maqolada 3D-bosma usulida ishlab chiqarilgan ikki xil turdagi — panjarasimon (lattice) va ichi bo'sh (hollow) — arxitekturalangan polimer armaturalarning sement kompozitining egilish xususiyatlariga ta'siri o'rganiladi. Asosiy e'tibor armaturaning geometrik shakli kompozitning mustahkamligi, deformatsiyalanish qobiliyati va sinish mexanizmiga qanday ta'sir ko'rsatishini tahlil qilishga qaratilgan.

Tadqiqot usullari

Materiallar. Tadqiqotda matritsa sifatida odatdagi sement qorishmasi (mortar) ishlatilgan. Armatura materiali sifatida esa termoplastik polimer (PLA - Polilaktid) FDM (Fused Deposition Modeling) usulida 3D-bosma printerida maxsus ishlab chiqarilgan.

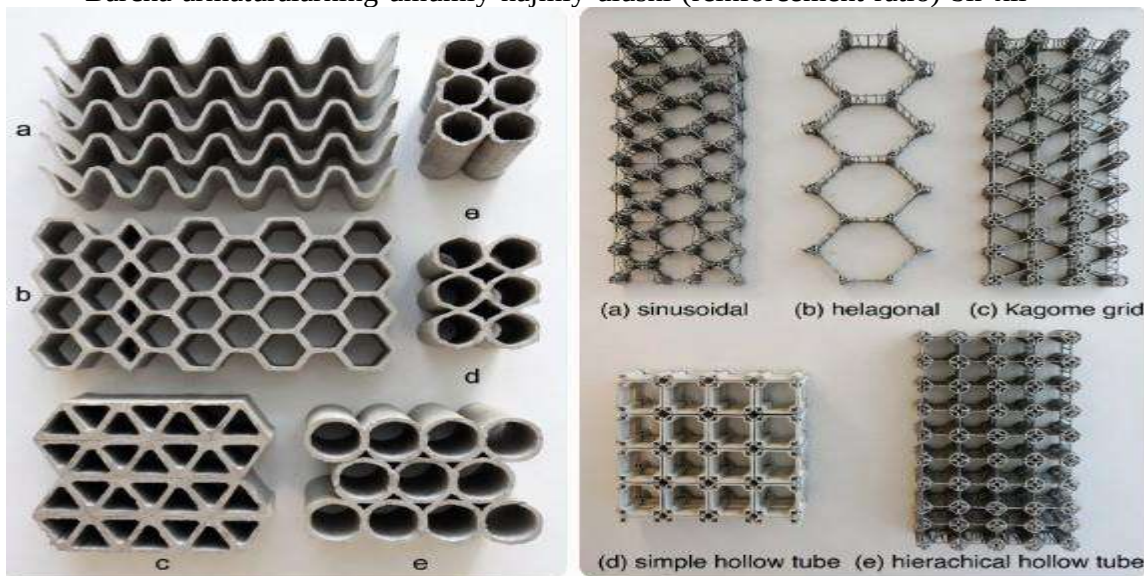
Arxitekturalangan Armaturalarni Loyihalash va Tayyorlash

Tadqiqotda ikki asosiy sinf armatura shakli o'rganilgan [1]:

1. **Panjara simon (lattice) armaturalar:** Bu turkumga Sinusoidal (to'liqinsimon), Hexagonal (olti burchakli) va Kagome (maxsus uchburchakli) tipidagi ochiq hujayrali tuzilmalar kiradi (1-rasm a, b, c).

2. **Ichi bo'sh (hollow) armaturalar:** Bu turkumga oddiy bir kanalli (Simple) va iyerarxik (bir necha ichki kanalli) (Hierarchical) ichi bo'sh naychalar kiradi (1-rasm d, e).

Barcha armaturalarning umumiy hajmiy ulushi (reinforcement ratio) bir xil



1-rasm.

Tadqiqotda foydalanilgan arxitekturalangan armatura turlari: (a) Sinusoidal panjara,

(b) Hexagonal panjara, (c) Kagome panjara, (d) Oddiy ichi bo'sh naycha, (e) Iyerarxik ichi bo'sh naycha [1].

Namunalar tayyorlash. To'g'ri burchakli shakldagi to'sin namunalari tayyorlangan ($40 \times 40 \times 160$ mm). Har bir to'sinning ichiga bir dona 3D-bosma armatura joylashtirilgan. Armatura to'liq sement qorishmasi bilan qoplangan. Solishtirish uchun armaturalanmagan (referens) namunalar ham tayyorlangan. Namunalar belgilangan muddatda (28 kun) suvda saqlanib, mustahkamlik to'plashi ta'minlangan (2-rasm)



2-rasm.

Sement kompoziti namunasining ko'ndalang kesimi: 3D-bosma polimer armatura (qora) sement matritsasi (kulrang) ichiga joylashtirilgan.

Mexanik sinovlar. Namunalarning egilishdagi xatti-harakati uch nuqtali egilish sinovi (three-point bending test) orqali o'rganilgan. Sinovlar maxsus universal sinov mashinasida o'tkazilgan. Sinov davomida yuk (load) va o'rta nuqtadagi egilish (mid-span deflection) qiymatlari qayd etilgan. Ushbu ma'lumotlar asosida quyidagi ko'rsatkichlar hisoblangan:

- Egilishdagi mustahkamlik (Modulus of Rupture - MOR)
- Qovushqoqlik (Toughness) - yuk-defleksiya egri chizig'i ostidagi yuza
- Egiluvchanlik (Ductility) - maksimal yukdan keyingi deformatsiyalanish qobiliyati

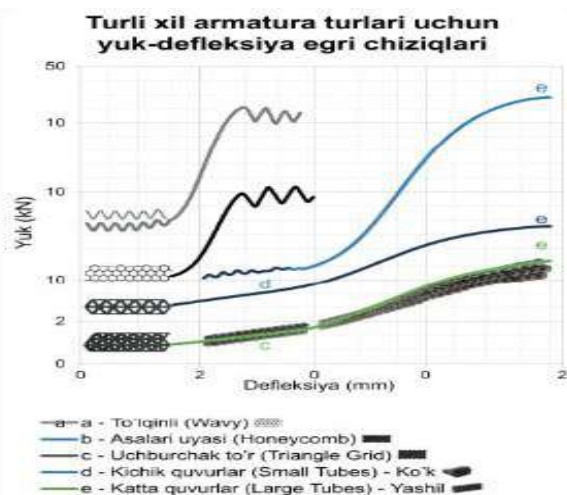
a. Mikrostruktura tahlili. Sinovdan o'tgan namunalarning ichki tuzilishi va sinish mexanizmlarini aniqlash uchun mikrokompyuter tomografiyasi (micro-computed tomography - μ -CT) usulidan foydalanilgan. Bu usul yordamida armatura va sement matritsasi orasidagi chegara, yoriqlarning tarqalishi va armaturaning deformatsiyasi batafsil tahlil qilingan.

3. Natijalar.

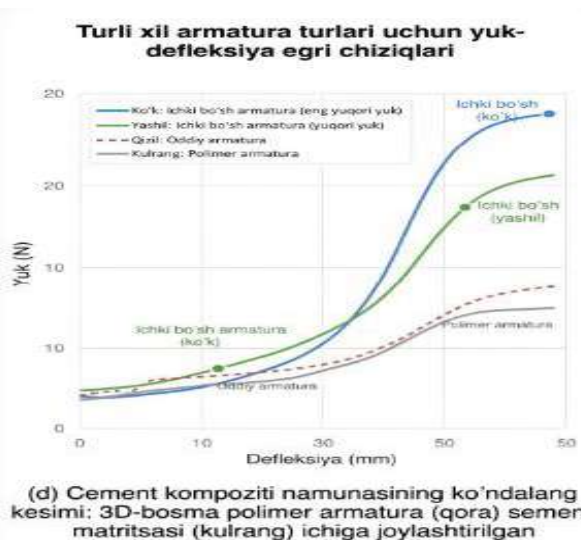
a. Egilish sinovlari natijalari

Uch nuqtali egilish sinovlari shuni ko'rsatdiki, barcha arxitekturalangan armaturalar sement kompozitining egilish xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshilagan. Asosiy natijalar quyidagilar [1]:

- Armaturalanmagan namunaga nisbatan, panjara simon armaturali kompozitlarda egilish mustahkamligi 2-3 barobar, qovushqoqlik esa 5-10 barobar oshgan.
- Ichi bo'sh armaturali kompozitlar esa panjara simon armaturalilarga nisbatan ancha yuqori mustahkamlik va qovushqoqlik ko'rsatgan. Xususan, iyerarxik ichi bo'sh armatura eng yuqori



[1] Ichi bo'sh armaturali however (ko'k va yashil chiziqlar) eng yuqori yuk va defleksiyani ko'rsatgan



natijalarni bergan (3-rasm).

3-rasm.

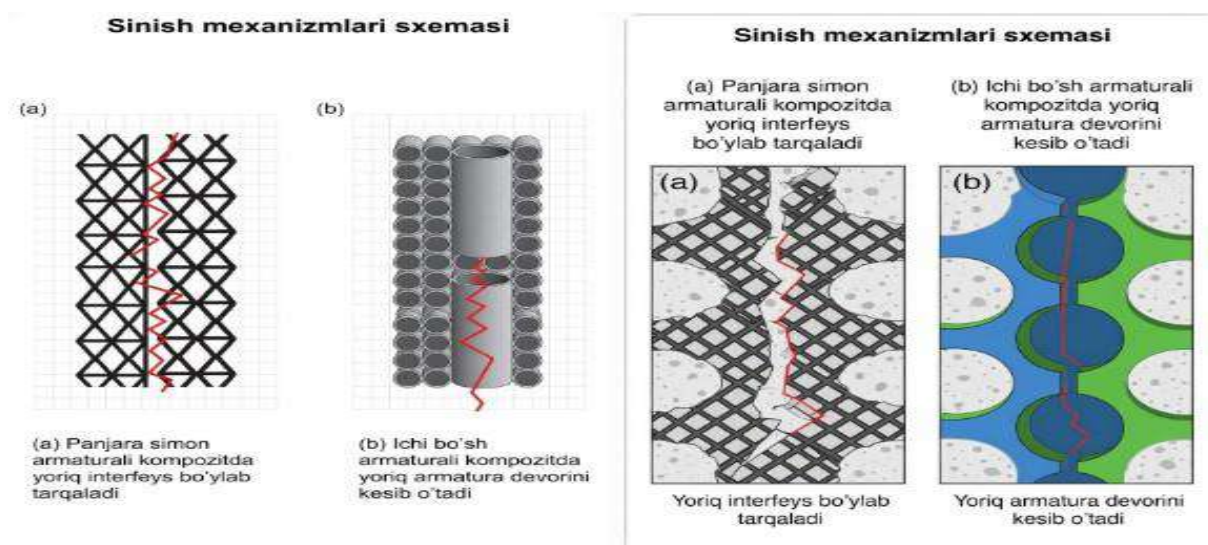
Turli xil armatura turlari uchun yuk-defleksiya egri chiziqlari. Ichi bo'sh armaturali namunalar (ko'k va yashil chiziqlar) eng yuqori yuk va defleksiyani ko'rsatgan [1].

Sinish mexanizmlari tahlili (μ -CT)

μ -CT tahlillari ikki xil armatura sinfi uchun butunlay farqli sinish mexanizmlarini aniqlagan (4-rasm):

• **Panjara simon armaturali namunalarda:** Sinish asosan polimer armatura va sement matritsasi orasidagi chegarada (interfeysda) sodir bo'lgan. Yoriq armatura bo'ylab tarqalib, uning matritsadan ajralishiga olib kelgan (adhesive failure).

• **Ichi bo'sh armaturali namunalarda:** Armatura va matritsa orasidagi bog'lanish mustahkam bo'lib, sinish armatura devorining o'zida (ichki qismida) sodir bo'lgan (reinforcement rupture). Armatura sinishdan oldin plastik deformatsiyaga uchragan va energiyani yutishda faol qatnashgan.



4-rasm.

Sinish mexanizmlari sxemasi: (a) Panjara simon armaturali kompozitda yoriq interfeys bo'ylab tarqaladi; (b) Ichi bo'sh armaturali kompozitda yoriq armatura devorini kesib o'tadi [1].

Muhokama. Olingan natijalar armatura geometriyasining kompozit materialning ishlash printsiplari - ga bevosita ta'sirini ko'rsatadi. Panjara simon armaturalar matritsa bilan nisbatan kichik sirt maydoniga ega va ochiq hujayrali tuzilishi tufayli matritsa bilan mexanik ilashish (interlocking) darajasi cheklangan. Bu esa yuk ostida ular orasidagi chegarada yoriq paydo bo'lishiga va armaturaning sirpanishiga olib keladi. Natijada, armaturaning potensial mustahkamligidan to'liq foydalanilmaydi.

Ichi bo'sh armaturalar esa, ayniqsa iyerarxik tuzilishga ega bo'lganlari, matritsa bilan mustahkamroq bog'lanish hosil qiladi. Armatura ichiga kirgan sement qorishmasi qo'shimcha mexanik ilashish nuqtalarini yaratadi. Bu esa armatura va matritsa birligidan deformatsiyalanishini ta'minlaydi. Yuklanish davom etganda, energiya armatura devorlarining bukilishi va plastik deformatsiyasiga sarflanadi. Armatura o'zining materiali sinish darajasiga yetgandagina kompozit butunlay ishdan chiqadi. Bu mexanizm kompozitning yuk ko'tarish qobiliyatini va energiya yutish (qovushqoqlik) darajasini sezilarli oshiradi [1].

Ushbu tadqiqot shuni ko'rsatadiki, armatura geometriyasini optimallashtirish orqali sement kompozitlarining xususiyatlarini tubdan yaxshilash mumkin. Ichi bo'sh, naycha-simon armaturalar, ayniqsa, yuqori egiluvchanlik va zarbabardoshlik talab qilinadigan konstruksiyalar uchun istiqbolli hisoblanadi. Kelajakdagi tadqiqotlar turli xil polimer materiallari va armatura geometriyalarining uzoq muddatli chidamliligiga, shuningdek, ularning sanoat miqyosida ishlab chiqarish texnologiyalariga qaratilishi lozim.

Xulosa. Ushbu maqolada 3D-bosma texnologiyasida ishlab chiqarilgan panjara va ichi bo'sh arxitekturalangan polimer armaturalarning sement kompozitining egilish xususiyatlariga ta'siri tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari quyidagi asosiy xulosalarga kelish imkonini beradi:

1. 3D-bosma arxitekturalangan polimer armaturalar sement kompozitining egilishdagi mustahkamligi, qovushqoqligi va egiluvchanligini sezilarli darajada oshirishi mumkin.
2. Armatura geometriyasi kompozitning sinish mexanizmini belgilaydi. Panjara simon armaturalarda sinish interfeysda sodir bo'lsa, ichi bo'sh armaturalarda armatura materialining o'zi sinadi.
3. Ichi bo'sh armaturalar, ayniqsa iyerarxik tuzilishga ega bo'lganlari, panjara simon armaturalarga nisbatan yuqori mustahkamlik va qovushqoqlik ko'rsatadi. Bu ularni yuqori samarali sement kompozitlari yaratish uchun istiqbolli yo'nalishga aylantiradi.

ADABIYOTLAR:

1. Namakiaraghi, P., Yen, E., & Farnam, Y. (2025). Using lattice and hollow architected polymeric reinforcement to improve flexural performance of cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 487, 142124.
2. Namakiaraghi, P., & Farnam, Y. (2024). Development of engineered polymeric reinforced cementitious composite (EPRC) using nature-inspired hollow architectures: Flexural experimental and numerical evaluations. *Journal of Building Engineering*, 97, 110789.
3. Ashrabo, A., & Tursunov, N. (2024). Qurilish materiallari va konstruksiyalari. To- shkent: Fan va texnologiya nashriyoti.

NBN NANOPLYONKASIDAGI O'TA O'TKAZUVCHANLIKNING ASOSIY FIZIKAVIY
XOSSALARI

Temirov Og'abek Farhod o'g'li,

Buxoro davlat universiteti tayanch doktoranti,
Buxoro davlat tibbiyot instituti "Biotibbiyot muhandisligi,
biofizika va informatika" kafedrası assistenti.

Ahadov Abdullo Amrullojon o'g'li,

Buxoro davlat universiteti tayanch doktoranti,
Buxoro davlat tibbiyot instituti "Biotibbiyot muhandisligi,
biofizika va informatika" kafedrası assistenti.

Djurayev Davron Rahmonovich,

Buxoro davlat universiteti, fizika kafedrası professori, fizika-matematika fanlari doktori

Annotatsiya. Ushbu maqolada NbN nanoplyonkalaridagi o'ta o'tkazuvchanlikning asosiy fizikaviy xossalari tahlil qilindi. Bugungi kunga kelib, NbN yupqa plyonkali o'ta o'tkazgichlar tajribalarda kuzatilgan turli xil fizikaviy xususiyatlarni aks ettiruvchi yagona nazariy mexanizm mavjud emas. O'ta yupqa plyonkalarda o'lcham effekti, fluktuatsion Xoll effekti kuchli bog'langan s-to'lqinli o'ta-o'tkazuvchanlik va ion nurlanishi ta'siri alohida namoyon bo'ladi. Natijalar NbN nanoplyonkalarida o'ta o'tkazuvchanlikni boshqaruvchi asosiy omillar sifatida stexiometriya, kristall tuzilma, qalinlik, tok tashuvchilar zichligi va defektlar konsentratsiyasini ajratib ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: NbN nanoplyonka, o'ta o'tkazuvchanlik, kritik harorat, Xoll effekti, tok tashuvchilar zichligi, panjara parametri, energiya yorig'i, magnit maydon singish chuqurligi, fluktuatsiyalar, defekt.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В
НАНОПЛЁНКАХ NbN

Аннотаци. В данной статье проведён анализ основных физических свойств сверхпроводимости в наноплёнках NbN. На сегодняшний день не существует единого теоретического механизма, который бы описывал все разнообразные физические характеристики тонкоплёночных сверхпроводников NbN, наблюдаемые в экспериментах. В ультратонких плёнках отдельно проявляются эффекты размерности, флуктуационный эффект Холла, сильно связанная s-волновая сверхпроводимость и влияние ионного облучения. Полученные результаты показывают, что в качестве основных факторов, определяющих сверхпроводимость в наноплёнках NbN, выступают стехиометрия, кристаллическая структура, толщина, плотность носителей тока и концентрация дефектов.

Ключевые слова: NbN наноплёнка, сверхпроводимость, критическая температура, эффект Холла, плотность носителей тока, параметр решётки, энергетическая щель, глубина проникновения магнитного поля, флуктуации, дефект.

FUNDAMENTAL PHYSICAL PROPERTIES OF SUPERCONDUCTIVITY IN NbN
NANOFILMS

Abstract. In this article, the main physical properties of superconductivity in NbN nanofilms are analyzed. To date, there is no single theoretical mechanism that describes the wide range of physical characteristics of thin-film NbN superconductors observed in experiments. In ultrathin films, size effects, the fluctuation Hall effect, strongly coupled s-wave superconductivity, and the influence of ion irradiation manifest themselves separately. The results show that the key factors governing superconductivity in NbN nanofilms are stoichiometry, crystal structure, thickness, charge carrier density, and defect concentration.

Keywords: NbN nanofilm, superconductivity, critical temperature, Hall effect, charge carrier density, lattice parameter, energy gap, magnetic field penetration depth, fluctuations, defect.

Kirish. Niobiy nitrid (NbN) o'ta o'tkazuvchan yupqa plyonkalar orasida amaliy va fundamental jihatdan eng muhim tizimlardan biridir. U nisbatan yuqori kritik haroratga, qisqa kogerent uzunligiga, katta

magnit singish chuqurligiga hamda texnologik barqarorlikka ega bo'lgani uchun Jozefson o'tishlari, issiqlik elektron yuqori sezuvchan detektor va bir fotonli detektorlar uchun istiqbolli material sifatida qaraladi [1, 2, 6].

Biroq NbN plyonkalarda o'ta o'tkazuvchanlik xossalari umumiy xususiyatga ega emas. Bir xil kimyoviy tarkibli tizimning o'zi qalinlik, o'stirish harorati, azotning bosimi, ion qoplama taglik material turi va defektlar zichligiga qarab sezilarli darajada turlicha xususiyatlarini ko'rsatadi [1, 2, 4, 6, 7]. Shu sababli NbN nanoplyonkasidagi o'ta o'tkazuvchanlikni faqat T_c qiymati bilan emas, balki panjara parametri, normal holatdagi qarshiligi, Xoll koeffitsienti, tashuvchilar zichligi, yuqori kritik maydon, energiya yorig'i va fluktuatsion ko'chish bilan birgalikda tahlil qilish zarur. Shu bilan birga, NbN yupqa plyonkalarining kristall tuzilishi, o'tish harorati, o'stirish tezligi, nurlanishga sezgirligi va o'ta yupqa epitaksial plyonkalardagi lokalizatsiya hodisalari bo'yicha klassik tadqiqotlar ham ushbu umumlashtirish uchun muhim tarixiy fon yaratadi [10-15].

Mazkur maqolaning asosiy maqsadi NbN nanoplyonkasidagi o'ta o'tkazuvchanlikning asosiy fizikaviy xossalarini tizimli ravishda umumlashtirish, ularning o'zaro bog'liqligini ko'rsatish va qaysi omillar hal qiluvchi rol o'ynashini ajratib berishdir.

Tadqiqot materiali va metodlari. Epitaksial o'ta o'tkazgichlar orasida NbN plyonkalarining Xoll effekti va ko'chish xossalari [1], xona haroratida o'stirilgan bir kristalli NbN plyonkalar [2], yupqa NbN plyonkalardagi fluktuatsion Xoll effekti [3], tabiiy xona haroratdagi taglik materiallarda o'stirilgan NbN plyonkalar xossalari [4], xuddi shu Xoll-effekt tadqiqotining talqini [5], xona haroratida yuqori- T_c NbN plyonkalar [6], ion nurlanishining NbN ga ta'siri [7], elektr zaryadi ta'sirida qoplama hosil qilish usulida tayyorlangan NbN va **nanochizi**q qurilmalari [8], hamda NbN qotishma tizim sifatidagi NbTiN plyonkalar bo'yicha tahliliy ish kiritildi [9].

Metodik yondashuv tahliliy sintezdan iborat bo'ldi. Har bir maqoladan o'stirish sharoiti, qalinlik, T_c , normal holat solishtirma qarshiligi, Xoll effekti ko'rsatkichlari, panjara parametri, energiya yorug'i, magnitdagi xossalari va strukturaviy tavsiflar ajratib olindi. So'ngra ular besh guruhga bo'lindi: strukturaviy omillar, elektron ko'chish, magnit va energetik parametrlar, qalinlik/fluktuatsiya effektlari, hamda defektlar va xossalari ta'siri.

1-jadval. NbN plyonkalarining parametrlari;

Manba	O'stirish tizim	Qalinlik	T_c	Qarshilik	Asosiy xulosa
[4]	Kimyoviy qoplamali taglik.	—	14.2 K gacha	—	O'ta-o'tkazuvchanlik saqlanadi.
[6]	Xona haroratida qoplama.	—	15.7 K	—	B1-faza
[2]	MgO substratida	5–200 nm	16K-12 K	5 nm da 80 mV·cm	$a \approx 0.446$ nm, $\Delta \approx 2.6$ meV, $\lambda \approx 176$ nm ga ega
[1]	Epitaksial NbN,	>50 nm	9.99–16.11 K	0.94–3.83 $\mu\Omega \cdot m$	n oshishi bilan T_c ortadi
[3]	119 Å qalinlikdagi o'ta yupqa plyonka	11.9 nm	14.96 K	—	Xoll belgi almashishiga, Gauss tarqalishidagi o'zgarishlar
[7]	Ar ⁺ ion nurlanishi	44–135 nm;	~20% kamayadi	150 $\mu\Omega \cdot cm$ gacha	Defektlar materialdagi elektronlar holat zichligini pasaytiradi.
[8]	Elektr zaryadi ta'sirida ion sochilishi	5 nm	7.8 K	253 $\mu\Omega \cdot cm$	SNSPD(O'ta -o'tkazuvchan Nanotrubka, Fotodetektor)qurilmalari uchun moslashtirilgan yuqori qarshilikka ega plyonka olingan

[9]	NbTiN asosidagi material tizimi	~10 nm	x bilan ortadi	—	Kritik harorat kimyoviy tarkib va nuqsonlar belgilaydi.
-----	---------------------------------	--------	----------------	---	---

1. Strukturaviy holat va tuzilish tarkib. 1983 va 1985-yillardagi tadqiqotlar NbN plyonkalarda yuqori T_c olish uchun B1 (NaCl-tipidagi fcc) faza hal omil ko'rsatgan [4, 6]. Azot sarfi va bosimi ta'sirida yuqori- T_c B1-faza hosil bo'ladi; undan chetlanganda esa substoixiometrik tetragonal fazalar paydo bo'lib, T_c pasayadi [6]. 1996-yilgi tadqiqotda esa MgO substratida amalga oshirilgan qizdirmasdan o'stirilgan bir kristalli NbN plyonkalar bir fazali yo'nalgan tuzilma, ustunsimon va granulali bo'shliqlarning yo'qligi bilan tavsiflangan [2].

2. Panjara parametri va T_c o'rtasidagi bog'lanish. Wang va hammualliflar panjara parametri 0.438–0.464 nm oralig'ida o'zgarganda o'ta o'tkazuvchan xossalar ham sezilarli o'zgarishini ko'rsatgan, bunda plyonkalarni $a \approx 0.446$ nm mos kelgan [2]. Ushbu natija xona haroratiga yaqin sharoitlarda o'stirilgan bir kristalli plyonkalar uchun strukturaviy optimallik mezoni sifatida qaralishi mumkin. Shu bilan birga Chockalingam va hammualliflar barcha epitaksial plyonkalarda T_c bilan panjara parametri orasida har doim ham yagona universal korrelyatsiya yo'qligini ko'rsatgan [1]. Demak, panjara parametri muhim, lekin u yakka boshqaruvchi parametrlar emas.

3. T_c , elektr qarshilik va tok tashuvchilar zichligi. Epitaksial NbN plyonkalarda $T_c \approx 9.99$ – 16.11 K oralig'ida o'zgarishi, normal holat solishtirma qarshiligi esa taxminan 0.94 dan $3.83 \mu\Omega \cdot m$ gacha o'zgarishi aniqlangan [1]. Xoll effekti tashuvchilar zichligi 6.48×10^{28} dan $1.98 \times 10^{29} m^{-3}$ gacha oshishi bilan T_c ham monoton ravishda ortishini ko'rsatgan [1, 5]. Muhim jihat shundaki, o'tkazuvchanlik n bilan deyarli chiziqli o'zgaradi, mobillik esa katta o'zgarish ko'rsatmaydi; bundan T_c pasayishining asosiy sababi sochilish emas, balki Fermi sathidagi holatlar zichligiga ta'sir qiluvchi tashuvchilar zichligining kamayishidir [1, 5].

4. Energiya yorug'i, singish chuqurligi va kogerent uzunligi. Yuqori sifatli bir kristalli NbN plyonkalarda tunnel o'tishlari yordamida energiya bo'shlig'i $\Delta \approx 2.6$ meV, kuchli bog'lanish parametri $\alpha \approx 4.16$ va magnit singish chuqurligi $\lambda(0) \approx 176$ nm deb baholangan [2]. Bu qiymatlar NbN ning kuchli bog'langan s-to'liqlik o'ta o'tkazgich ekanini tasdiqlaydi. Xoll-effekt va tok tashuvchilar dinamikasi tahlili bo'yicha esa epitaksial plyonkalarda tizim qotishmaviy rejimida ekanligi, ξ va H_{c2} parametrlarini shu qotishmaviy xossalar orqali baholash zarurligi ko'rsatilgan [1]. Fluktuatsiyalar bo'yicha 119 Å qalinlikdagi filmda $B_{c2}(0) \approx 18$ T va $\xi_0 \approx 43$ Å qiymatlar qayd etilgan [3].

5. Qalinlik effekti va o'ta yupqa plyonkalar. Xona haroratida o'stirilgan bir kristalli NbN filmlarda qalinlik 5 nm gacha kamayganda ham $T_c \approx 12$ K va qarshilik $\approx 80 \mu\Omega \cdot cm$ darajasida saqlanib qolishi kuzatilgan [2]. Bu natija yaxshi kristallangan o'ta yupqa NbN plyonkalarda o'lcham effekti keskin yemirilishga olib kelmasligini ko'rsatadi. Boshqa tomondan, siljituvchi kuchlanish ostida purkash usulida qizdirilmagan SiO_2 substratiga yotqizilgan 5 nm NbN plyonkalarda $T_c \approx 7.8$ K va $\rho \approx 253 \mu\Omega \cdot cm$ bo'lib, bunday past T_c va yuqori elektr qarshilik nanoo'lchamli sim detektorlarda ichki kvant samaradorligini oshirish uchun foydali bo'lishi mumkinligi ko'rsatilgan [8].

6. Tebranishlar bilan bog'liq ko'chish jarayonlarda 2017-yilgi tadqiqot o'ta yupqa 119 Å NbN plyonkasida $T_c \approx 14.96$ K atrofida Xoll koeffitsientining past magnit maydonlarda manfiydan musbatga o'zgarishini ko'rsatgan [3]. Bu hodisa qisqa yashovchi Kuper juftlari tufayli yuzaga keluvchi fluktuatsion o'tkazuvchanlik bilan izohlangan va **Gauss taqsimotiga ega tasodifiy o'zgarish** nazariyasi bilan muvofiqlik topilgan [3]. Shunday qilib, T_c ga yaqin sohada NbN ning elektr xossalari oddiy Drude modeli doirasidan chetlashadi va fluktuatsion komponentni hisobga olish talab etiladi.

7. Tartibsizlik, nurlanish va defektlar. Ion nurlanishi bo'yicha klassik tadqiqotlarda 200 keV Ar^+ ionlari bilan zararlash **yagona kristall** NbN plyonkalarda T_c ni yuqori dozada taxminan 20% ga kamaytirishi, bu esa Fermi sathidagi holatlar zichligining kamayishi bilan bog'liqligi ko'rsatilgan. Polikristalli plyonkalarda esa chegaralari defektlar uchun kimyo va muhim material vazifasini bajarib, nurlanish ta'sirini nisbatan yumshatadi [7]. Bu natija Xoll-effekt ishlaridagi xulosa bilan to'g'ri keladi: Kvant tartibsizlik muhim bo'lsada, T_c ni belgilovchi asosiy bo'lak ko'pincha elektron holatlar zichligi va tok tashuvchilar zichligi bilan bog'liq [1, 5, 7].

8. Natijalar va qiyosiy tahlillar Elektr potentsial bilan purkash NbN asosidagi SNSPD (o'ta o'tkazuvchi nanochiziqli yagona foton detektor) qurilmalarida 38 ps tebranishi va to'yish hisoblash rejimi kuzatilgani material parametrlarini maqsadli boshqarish amaliy samaradorlikka olib kelishini ko'rsatadi [8]. NbTiN bo'yicha tahliliy ishda esa Ti ulushi ortishi bilan T_c ortishi kuzatilgan [9]. Bu natija sof NbN uchun to'g'ridan-to'g'ri qo'llanmasa-da, nitrit o'ta o'tkazgichlarda kimyoviy tarkib va tartibsizlik muvozanatini boshqarish T_c ni nozik sozlash imkonini ko'rsatadi.

Muhokama. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, NbN nanoplyonkasidagi o'ta o'tkazuvchanlikni bitta parametr bilan tushuntirish yetarli emas. Asosiy e'tibor B1-fazani olish, stexiometriyani barqarorligini ta'minlash va purkash parametrlarini optimallashtirishga qaratilgan bo'lad [4, 6]. Keyingi bosqichda nazariy va eksperimental e'tibor elektron ko'chish, Xoll effekti va qotishmalar fizikasi tomon siljigan [1, 3, 5, 7].

Manbalar o'rtasidagi eng muhim umumiy xulosa — yuqori T_c faqat “kamroq elektr qarshilik” bilan emas, balki “ kristall-kimyoviy bog'lanish va yetarli tok tashuvchilar zichligi va nazorat qilinadigan defektlar” kombinatsiyasi bilan bog'liq. Wang va hammualliflar uchun optimal $a \approx 0.446$ nm va $T_c \approx 16$ K bo'lgan [2]. Chockalingam va hammualliflar aynan shunday diapazonda T_c ning n bilan monoton bog'liqligini ko'rsatadi [1, 5]. Bu ikki natija bir-birini inkor etmaydi; aksincha, strukturaviy optimallik elektron zichlikning ma'lum qiymatlarini shakllantiradi, degan fikrni kuchaytiradi.

O'ta yupqa plyonkalar masalasida ham ma'lum ikkita turli bosqichlari ketma-ketligi kuzatiladi. Kvant epitaksial kristallangan 5 nm plyonkalarda T_c yetarlicha yuqori saqlanadi [2]. Ammo amorf yoki qizdirilmagan taglik materiallarda o'stirilgan, yuqoriroq tartibsiz 5 nm plyonkalarda T_c sezilarli kamayadi [8]. Demak, qalinlikning o'zi emas, balki qalinlik kamayganda kuchayadigan tartibsiz, qo'pol sirt va fazaviy nomukammallik asosiy cheklovchi omillardir.

T_c yaqinidagi Xoll koeffitsiyentining teskari ishoraga aylanishi hodisasi NbN ni faqat amaliy sensor materiali sifatida emas, balki kuchli fluktuatsiyalarni o'rganish uchun ham qulay model tizimga aylantiradi. Shu jihatdan NbN o'ta o'tkazuvchanlikning uchta rejimini birlashtiradi: Optimal plyonkalarda yuqori T_c va katta H_{c2} ; o'ta yupqa plyonkalarda kuchli 2D-fluktuatsiyalar, defektli plyonkalarda esa tartibsizlikka asoslangan ko'chish. Ushbu xususiyatlar NbN ni fundamental fizikasi va elektron fizika o'rtasida ko'prik vazifasini bajaradigan materialga aylantiradi.

Xulosa. NbN nanoplyonkalaridagi o'ta o'tkazuvchanlikning asosiy fizikaviy xossalari tahlili quyidagilarni ko'rsatdi: birinchidan, optimal B1-faza va to'g'ri stexiometriya yuqori T_c ni ta'minlaydigan bazaviy shartdir; ikkinchidan, epitaksial plyonkalarda T_c ko'proq tok tashuvchilar zichligi va Fermi sathidagi holatlar zichligi bilan belgilanadi; uchinchidan, panjara parametri 0.446 nm atrofidagi strukturaviy holat, $\Delta \approx 2.6$ meV energiya yorig'i va $\lambda \approx 176$ nm singish chuqurligi yuqori sifatli NbN uchun xarakterli qiymatlardir; to'rtinchidan, o'ta yupqa plyonkalarda fluktuatsiyalar, Ikki o'lchovli (2D) transport xatti-harakati va ta'siri keskin oshadi; beshinchidan, ion nurlanishi va nuqsonlar T_c ni kamaytiradi, ammo ularning ta'siri plyonka mikrostrukturasi bilan modulyatsiyalanadi. Amaliy nuqtai nazardan, NbN nanoplyonkalarida yuqori o'ta o'tkazuvchanlik xossasini olish uchun o'stirish harorati, azotning qisman bosimi, purkash quvvati, taglik material mosligi, qatlam qalinligi va defektlar darajasini kompleks nazorat qilish talab etiladi. Fundamental nuqtayi nazardan esa NbN tizimi kuchli bog'langan s-to'lqinli o'ta o'tkazuvchanlik, kvant tartibsizlik, elektr xususiyatlari va fluktuatsion Xoll effektini o'zida mujassamlashtiradigan sodda model uchun obyekt sifatida ajralib turadi.

ADABIYOTLAR:

1. Chockalingam S.P., Chand M., Jesudasan J., Tripathi V., Raychaudhuri P. Superconducting properties and Hall effect of epitaxial NbN thin films // *Physical Review B*. 2008. Vol. 77. Art. 214503.
2. Wang Z., Kawakami A., Uzawa Y., Komiyama B. Superconducting properties and crystal structures of single-crystal niobium nitride thin films deposited at ambient substrate temperature // *Journal of Applied Physics*. 1996. Vol. 79, No. 10. P. 7837–7842.
3. Destraz D., Ilin K., Siegel M., Schilling A., Chang J. Superconducting fluctuations in a thin NbN film probed by the Hall effect // *Physical Review B*. 2017. Vol. 95. Art. 224501.
4. Bacon D.D., English A.T., Nakahara S., Peters F.G., Schreiber H., Sinclair W.R., van Dover R.B. Properties of NbN thin films deposited on ambient temperature substrates // *Journal of Applied Physics*. 1983. Vol. 54. P. 6509–6516.
5. Chockalingam S.P., Chand M., Jesudasan J., Tripathi V., Raychaudhuri P. Superconducting properties and Hall Effect of epitaxial NbN thin films (preprint version) // User-supplied manuscript.
6. Thakoor S., Lamb J.L., Thakoor A.P., Khanna S.K. High T_c superconducting NbN films deposited at room temperature // *Journal of Applied Physics*. 1985. Vol. 58, No. 12. P. 4643–4648.
7. Juang J.Y., Rudman D.A., Talvacchio J., van Dover R.B. Effects of ion irradiation on the normal state and superconducting properties of NbN thin films // *Physical Review B*. 1988. Vol. 38, No. 4. P. 2354–2360.

8. Dane A.E., McCaughan A.N., Zhu D., Zhao Q., Kim C.-S., Calandri N., Agarwal A., Bellei F., Berggren K.K. Bias Sputtered NbN and Superconducting Nanowire Devices // User-supplied accepted manuscript.
9. Hazra D., Tsavdaris N., Mukhtarova A., Jacquemin M., Blanchet F., Albert R., Jebari S., Grimm A., Konar A., Blanquet E., Mercier F., Chapelier C., Hofheinz M. Superconducting properties of NbTiN thin films deposited by high-temperature chemical vapor deposition // *Physical Review B*. 2018. Vol. 97. Art. 144518.
10. Oya G., Onodera Y. Transition temperatures and crystal structures of single-crystal and polycrystalline NbN_x films // *Journal of Applied Physics*. 1974. Vol. 45, No. 3. P. 1389-1397.
11. Deen M.J. The Effect of the Deposition Rate on the Properties of DC-Magnetron-Sputtered Niobium Nitride Thin Films // *Thin Solid Films*. 1987. Vol. 152. P. 535-544.
12. Sadagopan V., Gatos H.C., Hechler K., Saur E. Fast neutron damage and the current carrying capacity of niobium nitride // *Zeitschrift fur Physik*. 1969. Vol. 225, No. 3. P. 231-236.
13. Ezaki S., Makise K., Shinozaki B., Odo T., Asano T., Terai H., Yamashita T., Miki S., Wang Z. Localization and interaction effects in ultrathin epitaxial NbN superconducting films // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2012. Vol. 24, No. 47. Art. 475702.
14. Shy Y.M., Toth L.E., Somasundaram R. Superconducting properties, electrical resistivities, and structure of NbN thin films // *Journal of Applied Physics*. 1973. Vol. 44, No. 12. P. 5539-5545.
15. Rogener H. Zur Supraleitung des Niobnitrids // *Zeitschrift fur Physik*. 1952. Vol. 132. P. 446-467.

VAKUUM TERMIK BUG'LANTIRISH USULI YORDAMIDA TAYYORLANGAN CsPbBr₃ NOORGANIK PEROVSKIT QATLAMLARINING FOTOOPTIK XUSUSIYATLARI VA ULARNING TAHLILI

Shuhratova Latofat O'tkir qizi,

O'z.R.FA Fizika-texnika instituti tayanch doktoranti

latofatxonshuhratova@gmail.com

Kabulov Rustam Rashidovich,

O'z.R.FA Fizika-texnika instituti f.-m.f.n., katta ilmiy xodimi

krr1982@bk.ru

Annotatsiya. Ushbu maqolada 240 nm qalinlikdagi CsPbBr₃ perovskit yupqa qatlamlarini Vakuumli termik bug'lantirish texnologiyasi yordamida tayyorlanishi va uning fotooptik xususiyatlari tahlil qilingan. Qatlam namunasini UV-Vis spektrofotometri yordamida tadqiq qilindi. Olingan natijalarga ko'ra, qatlamning taqiqlangan soha energiyasi kengligi (~2.33 eV) bo'lib, bu uning fazaviy va tarkibiy barqarorligini ko'rsatadi. Ushbu tadqiqot natijalari kelajakda perovskit asosidagi optoelektron qurilmalar, xususan, quyosh elementlari va yorug'lik chiqaruvchi diodlarni ishlab chiqarish uchun muhim ilmiy asos bo'lishi mumkin.

Kalit so'zlar. Perovskitlar, yorug'lik chiqaruvchi diodlar, vakuumli termik bug'lantirish usuli, optoelektronik qurilmalar, taqiqlangan soha kengligi, fotoluminessensiya, 3D o'lchamli, nurlanish energiyasi.

ФОТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ СЛОЕВ ПЕРОВСКИТА CSPBBR₃, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ, И ИХ АНАЛИЗ

Аннотация. В данной работе проанализированы фотооптические свойства тонких пленок перовскита CsPbBr₃ толщиной 240 нм, полученных методом вакуумного термического испарения. Образец пленки исследовали с помощью УФ-Вид спектрофотометра. Согласно полученным результатам, энергия запрещенной зоны пленки составляет (~2,33 эВ), что указывает на ее фазовую и структурную стабильность. Результаты данного исследования могут стать важной научной основой для будущего производства оптоэлектронных устройств на основе перовскитов, в частности, солнечных элементов и светодиодов.

Ключевые слова: перовскиты, светодиоды, метод вакуумного термического испарения, оптоэлектронные устройства, запрещенная зона, фотoluminesценция, трехмерное излучение, энергия излучения.

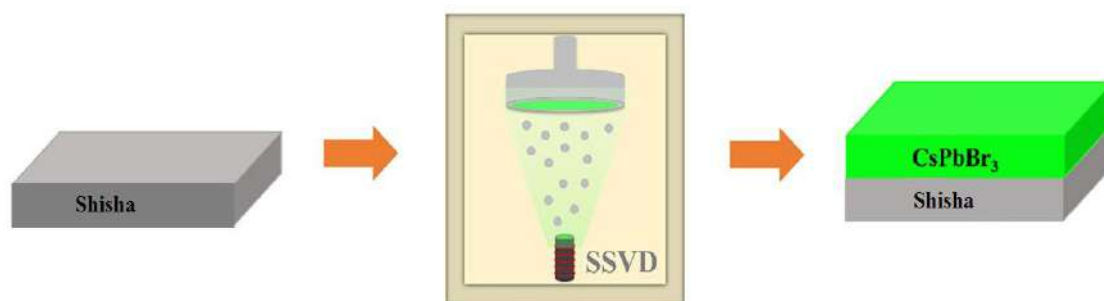
PHOTO-OPTICAL PROPERTIES OF INORGANIC LAYERS OF PEROVSKITE CSPBBR₃ PRODUCED BY VACUUM THERMAL EVAPORATION AND THEIR ANALYSIS

Abstract. This paper analyzes the photooptical properties of 240 nm thick CsPbBr₃ perovskite thin films obtained by vacuum thermal evaporation. A film sample was analyzed using a UV-Vis spectrophotometer. The obtained results indicate that the band gap energy of the film is ~2.33 eV, indicating its phase and structural stability. The results of this study may provide an important scientific basis for the future production of perovskite-based optoelectronic devices, particularly solar cells and LEDs.

Keywords: perovskites, LEDs, vacuum thermal evaporation, optoelectronic devices, band gap, photoluminescence, three-dimensional radiation, radiation energy.

Kirish. So'nggi yillarda noorganik metall-galogenid perovskitlar, xususan CsPbBr₃, yuqori termik barqarorligi, tor emissiya spektri va yuqori yorug'lik yutilish koeffitsiyenti kabi afzalliklari tufayli optoelektronika sohasida istiqbolli material sifatida keng o'rganilmoqda [1,2]. CsPbBr₃ ning taqiqlangan soha kengligi 2.2–2.4 eV oralig'ida bo'lib, u yashil spektr sohasida samarali nurlanish beradi [3]. Shu sababli u yorug'lik chiqaruvchi diodlar (LED), fotodetektorlar va quyosh elementlarida keng qo'llanilmoqda [4,5]. Perovskit yupqa qatlamlarni asosiy ikki xil usulda tayyorlash mumkin. Bular erituvchiga asoslangan usullar

va erituvchisiz usullar. Erituvchili usullar yordamida perovskit yupqa qatlamlar tayyorlash tadqiqotchilar tomonidan keng qo'llanilmoqda, Biroq CsBr ni eritmada yomon eruvchanligi tufayli, silliq sirtli CsPbBr₃ qatlamlarini olish qiyinroq jarayondir. [5]; Erituvchi qizdirish orqali chiqarib tashlanganda, qoldiq erituvchi qoladi va uni shamollatgich yordamida chiqarilganda tirqishlar hosil bo'ladi. Natijada ushbu [6] nuqsonlar qurilmaning ishlashiga salbiy ta'sir qiladi. Shuning uchun olimlar perovskit qatlamlarni optimallashtirish uchun erituvchisiz usul bo'lib hisoblangan vakuumli termik bug'lantirish usulini tanlashdi. Vakuumli termik bug'lantirish yuqori nazorat va barqarorlikni ta'minlagani sababli ilmiy hamjamiyatda tobora ommalashib bormoqda. Ushbu usul erituvchidan kelib chiqadigan muammoni hal qiladi va shu bilan birga erituvchi uchun sarflanadigan xarajatni tejaydi. Bu usulning afzalligi shundaki, u kristal sifatini yaxshilash uchun sezilarli salohiyatga ega bo'lgan barqaror, yuqori sifatli va bir xil tuzilgan 3D o'lchamli sirtlarni tayyorlashni ta'minlashi mumkin. Hozirgi vaqtda ushbu usul yordamida tayyorlangan yuqori sifatli perovskit yorug'lik chiqaruvchi qatlamlarni olish imkonini berdi [7]. Bu shuni anglatadiki, katta yoki kichik sohalarda qatlamlarning bir xilligi va mustahkamligi ta'minlanadi. Bundan tashqari, u kichik o'lchamli komponentlar uchun mos kelishi tufayli yuqori aniqlikdagi metall niqoblar yordamida mikron o'lchamdagi shakllarni olish imkonini beradi. Bu esa uni perovskit asosli LED ishlab chiqarish uchun muqobil usullardan biriga aylantiradi. Bu texnologiyani turli xil usullari bor masalan: bir manbali vaakumli termik bug'lantirish, ikki manbali vaakumli termik bug'lantirish, ko'p manbali vaakumli termik bug'lantirish va boshqalar. Ikki manbali birgalikda bug'lantirish usuli ikki xil materialning alohida manbalardan bir vaqtda bug'latishini talab etadi. Ularning o'zaro nisbati va yotqizilish tezligini qat'iy nazorat qilish zarurati jarayonning texnologik murakkabligini oshiradi. Ko'p manbaali vaakumli termik bug'lantirish usullari ham yanada jarayonni murakkablashishiga olib keladi. Texnologik murakkablikni kamaytirish uchun bir manbadan bug'latish (SSCVD) metodikasi taklif etilgan bo'lib [8], bunda perovskit prekursor kukunlari aralashmasi to'g'ridan-to'g'ri taglikka yotqiziladi. Mazkur yondashuv nisbatan oddiyliigi bilan bir qatorda, hosil bo'lgan qatlamlarning yuqori morfologik xususiyatlari va minimal strukturaviy nuqsonlari bilan ajralib turadi. Olingan natijalarning sifati bo'yicha ushbu qatlamlar murakkabroq hisoblangan ikki manbali birgalikda bug'latish usulida tayyorlangan namunalar bilan to'liq raqobatlasha oladi. Ushbu ishda biz bir manbadan termik vakuumda bug'lanish usuli qurilmasini ishlab chiqarib texnologik jarayonini soddalashtirdik. To'g'ridan to'g'ri issiqlik bilan ishlov berish jarayonlari perovskit qatlami kristallarining o'sishiga yordam beradi, kristall tuzilishini yaxshilaydi va nuqsonlarning shakllanishini kamaytiradi (1-rasm).



1-rasm. Perovskit qatlamini vakuumli termik bug'lantirish usuli yordamida tayyorlashning sxematik ko'rinishi

CsPbBr₃ vakuumli termik bug'lantirish usuli yordamida shisha taglikka sintez qilingandasn keyin qatlamlarning fotooptik xususiyatlari o'rganildi. Yupqa qatlamlarning fotooptoelektronik qurilmalardagi muhim parametrlari bu yutilish koeffitsiyenti, taqiqlangan soha kengligi va qatlam qalinligidir.

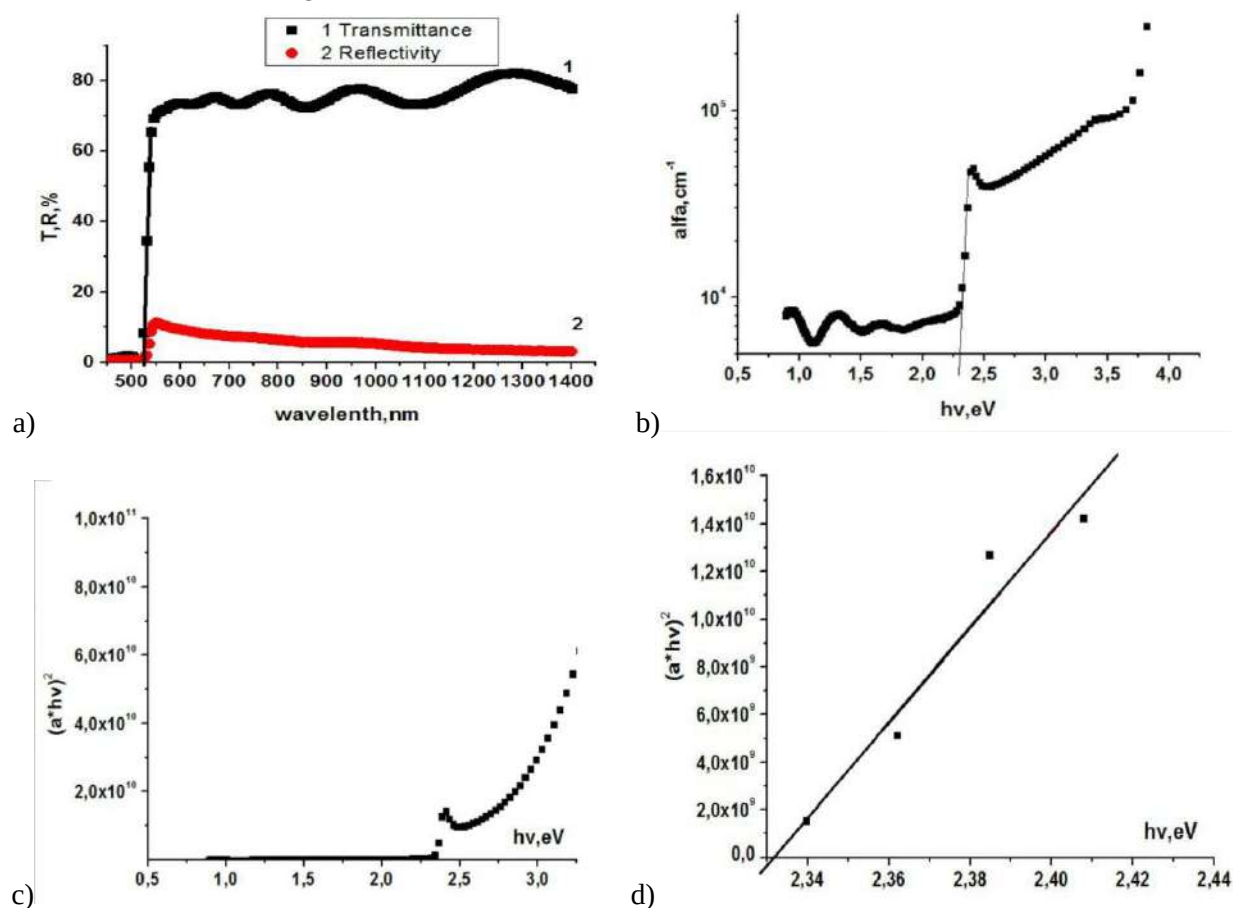
Ekspirimental usullar. Materiallar va uskunalar. Eksperimentda ishlatilgan CsPbBr₃ birikmasi oldindan CsBr va PbBr₂ moddalari 1:1 nisbatda (modda atom miqdoriga nisbatan) ya'ni mos ravishda 31,67 mg va 18,33mg miqdorda olindi va aralashtirildi. Keyin vakuum termik purkash manbaiga joylashtirildi. Taglik sifatida 1 mm qalinlikdagi shaffof shisha ishlatildi. Shisha taglik ultratovushli vannada distillangan suv va izopropil spirti bilan 2 bosqichda, har birida 10 minutdan tozalandi va havo purkash orqali quritildi. Bug'lanish jarayoni yuqori vakuumli termik bug'latish qurilmasi VUP-5 da olib borildi.

Bug'lanish jarayoni jarayoni 10⁻⁵ torr bosimdagi vakuum sharoitida amalga oshirildi. Bug'lanish bitta manbada amalga oshirildi. Qatlam yotqizish vaqtida, birinchi navbatda taglik 200 °C gacha qizdirildi 5 daqiqa shu haroratda ushlab turildi keyin o'chirildi. So'ng manbani qizdirish boshlandi va uning harorati

~500 °C gacha yetkazildi va shu haroratda 5 daqiqa ushlab turildi. Qatlamlar yotqizilgach, qurilmani o'chirib ularni xona haroratigacha asta-sekin sovitildi. Ushbu jarayon bir necha marta takrorlanib, turli qalinlikdagi perovskit yupqa qatlamlar olindi.

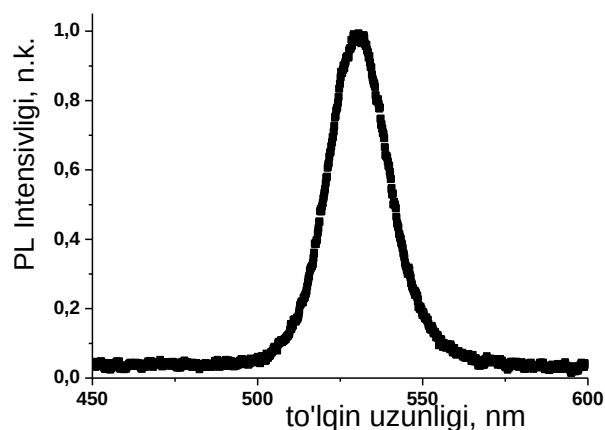
Spektrofotometrik o'lchovlar. Qatlamlarning optik xususiyatlari UV-Vis spektrofotometrda 330–1000 nm optik nurlanish oralig'ida yorug'likning optik o'tish va qaytish ko'effitsientlarini tadqiq qilish orqali olib borildi. Perovskitlarning yutilish spektrlari asosida Taus metodikasi yordamida optik taqiqlangan soha kengligi qiymati aniqlandi. Yutilish ko'effitsiyentining yuqori qiymatlari to'liq uzunliklarining past diapazonida kuzatildi, bu esa materialning yorug'likni samarali yutishini tasdiqlaydi.

Natijalar va muhokama. Tajriba davomida tayyorlangan qatlam qalinligi 240 nm 1a-rasmda CsPbBr₃ yupqa qatlamlarining optik o'tish (T) va qaytish ko'effitsientlari (R) berilgan. T va R lar 540 nm dan boshlab keskin oshib borishini ko'rsatdi. 1b-rasmda CsPbBr₃ yupqa qatlamlarining yutilish ko'effitsiyentlarining (α), (hv, eV) bog'liqligi ko'rsatilgan. Taqiqlangan soha kengligi (E_g) qiymati aniqlash uchun yutilish ko'effitsiyenti Taus ifodasi orqali nurlanish energiyasiga (hv, eV) o'rtasidagi bog'liqlik grafigi chizildi: $(\alpha \cdot hv)^2 = A(hv - E_g)$ (1c-rasm). $(\alpha \cdot hv)^2$ bilan hv grafigining chiziqli qismining $\alpha=0$ nuqtasiga ekstrapolyatsiya qilish orqali hv absissa o'qida kesishgan nuqtasi E_g ni beradi (1d-rasm). Hisoblangan energiya taxminan 2,33 eV ni tashkil etadi, bu CsPbBr₃ perovskit qatlamlari uchun odatiy qiymatlarga mos keladi. Bu holat qatlamlarning kristall fazasining bir xil shakllanganini ko'rsatadi. Absorbsiya spektrlari 330-1000 nm to'liq uzunliklari oralig'ida SPECTRO UV/VIS Double Beam (UVD-3500, Labomed Inc.) spektrofotometri yordamida o'lchandi. O'lchovlar uchun shisha tagliklar etalon sifatida ishlatildi.



2-rasm: CsPbBr₃ qatlamlari uchun a) to'liq uzunligining yutilish va qaytish ko'effitsiyentlariga bog'liqligi; b) yutilish ko'effitsiyenti va yoritish energiyasi bog'liqligi; c) $(\alpha \cdot hv)^2$ va $h\nu$ orasidagi Taus bog'lanishi; d) Taus bog'lanishining chiziqli qismining $\alpha=0$ nuqtasiga ekstrapolyatsiyasi orqali E_g ni aniqlash $E_g = 2.33 \pm 0.02$ eV

Bu grafiklarda yana bir jihat e'tiborni tortishi mumkin, taqiqlangan soha yaqinida maksimumning paydo bo'lishi (1,b,c-rasmlar). 1b – rasmda $\alpha_{\max}(h\nu) = 2.4$ eV da erishadi. Taus usuli orqali aniqlangan $E_g = 2.33$ eV. Farq qilayotgan qiymat taxminan eksitonning CsPbBr₃ da bog'lanish energiya miqdoriga teng ($E_e = 65 \pm 13$ meV). 1-b rasmdagi $\alpha(h\nu)$ bog'liqligidagi $\alpha_{\max}(h\nu) = 2.4$ eV CsPbBr₃ qatlamidagi eksitonlarning yutilishidan kelib chiqadigan maksimumdir.



3-rasm. CsPbBr₃ qatlamlarining fotolyuminissensiya spektri

CsPbBr₃ yupqa qatlamining fotolyuminissensiya spektri 532 nm markazda kuchli va tor emissiya cho'qqisini namoyish etadi, bu taxminan 2,33 eV taqiq soha energiyasiga mos keladi. Yarim maksimaldagi tor to'liq kenglik (FWHM $\approx$ 20 nm) qatlam ichida yuqori kristall sifatini ko'rsatadi. Ikkilamchi emissiya chiziqlari yoki nuqson bilan bog'liq yelkalarining yo'qligi chuqur tuzoq holatlarining past zichligi va dominant eksitonik nurlanish rekombinatsiyasini ko'rsatadi. Umuman olganda, tayyorlangan CsPbBr₃ yupqa qatlamining yuqori samarali optoelektronik qurilmalar uchun mosligini ko'rsatadi.

Xulosa Ushbu ishda CsPbBr₃ asosidagi perovskit qatlamlari muvaffaqiyatli tarzda vakuum termik bug'lantirish usuli bilan shisha taglikka yotqizildi. 240 nm qalinlikdagi qatlamlar tayyorlandi va ularning optik xossalari o'rganildi. UV-Vis spektrofotometriya yordamida olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, qatlamlarning taqiq soha qiymati barcha namunalar uchun deyarli o'zgarmas ($\sim$ 2.33 eV) bo'lib chiqdi. Bu esa fazaviy barqarorlikning yuqoriligini tasdiqlaydi. Tahlillari CsPbBr₃ yupqa qatlamlarida nuqsonlar zichligi past, nurlanish rekombinatsiyasi samarali va materialning optik sifati yuqori ekanini tasdiqlaydi. Ushbu usul bilan olingan qatlamlar turli optoelektron qurilmalarda, xususan, LED va fotodetektorlar uchun istiqbolli material sifatida tavsiya etilishi mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. Tang, Z.-K. et al. Enhanced optical absorption via cation doping hybrid lead iodine perovskites. *Sci. Rep.* 7, 7843 (2017).
2. Maes, J. et al. Light absorption coefficient of CsPbBr₃ perovskite nanocrystals. *J. Phys. Chem. Lett.* 9, 3093–3097 (2018).
3. Kim, H. J. et al. High mobility in a stable transparent perovskite oxide. *Appl. Phys. Express* 5, 061102 (2012).
4. Cai, Y. et al. 2D-layered manganese perovskite with high mobility. *Adv. Funct. Mater.* 33, 2211191 (2023).
5. Wang, Y. et al. In-situ stabilization strategy for CsPbX₃-silicone resin composite with enhanced luminescence and stability. *Nano Energy* 78, 105150 (2020).
6. Zhuang, L. et al. Mixed dimensional 0D/3D perovskite heterostructure for efficient green light-emitting diodes. *J. Mater. Chem. C* 9, 14318–14326 (2021).
7. Feng, W. et al. Efficient all-inorganic perovskite light-emitting diodes enabled by manipulating the crystal orientation. *J. Mater. Chem. A* 9, 11064–11072 (2021).
8. Yuan, F. et al. Hole transport layer free perovskite light-emitting diodes with high-brightness and air-stability based on solution processed CsPbBr₃-Cs₄PbBr₆ composites films. *Front. Chem.* 10, 828322 (2022).
9. Sebastian B.M, et al., Light-emitting electrochemical cells: recent progress and future prospects, *Materials Today*, Volume 17, Issue 5, June 2014, Pages 217-223. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.04.029>
10. D. Gets, M. Alahbakhshi, A. Mishra, R. Haroldson, A. Papadimitratos, Artur Ishteev, D. Saranin, S. Anoshkin, A. Pushkarev, E. Danilovskiy, S. Makarov, J. D. Slinker, A. Zakhidov. Reconfigurable Perovskite LEC: Effects of Ionic Additives and Dual Function Devices, *Adv. Optical Mater.* 2020, 2001715. <https://doi.org/10.1002/adom.202001715>

Si–Eu TIZIMI SIRT QATLAMINING FAZAVIY HOLATI, INFRAQIZIL SPEKTRAL XUSUSIYATLARI VA MORFOLOGIK NOTEKISLIGI: XRD, FTIR, SEM VA EDS USULLARI ASOSIDAGI KOMPLEKS TAHLIL

Saidov Safo Olimovich,

Buxoro davlat universiteti fizika kafedrası o‘qituvchisi

safo.saidov.64@mail.ru,

Salomov Toxir Baqoyevich,

Buxoro davlat universiteti fizika kafedrası magistranti

toxirsalomov188@gmail.com

Abdug‘aniyev Yo‘ldoshali Adashali o‘g‘li,

I. Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, f.-m.f.f.d. (PhD)

Annotatsiya. Maqolada Si–Eu tizimi sirt qatlamining fazaviy holati, infraqizil spektral xususiyatlari va morfologik notekisligi XRD, FTIR, SEM hamda EDS ma‘lumotlarini o‘zaro bog‘liq holda talqin qilish asosida tahlil qilindi. WPPF qayta ishlash natijalariga ko‘ra, namunaning fazaviy asosi kubik Si bo‘lib, uning massa ulushi $99.37 \pm 0.07 \%$ ni tashkil etdi. $0.63 \pm 0.07 \%$ darajadagi juda kichik ikkilamchi komponent esa qo‘shimcha mustaqil tasdiqlovchi tahlillarsiz aniq faza sifatida talqin qilinmadi. FTIR spektrida 3428 va 3324 cm^{-1} keng polosalar adsorblangan namlik va gidroksil holatlar bilan, 2113 cm^{-1} signal esa Si–H bog‘lanishlari bilan mos keldi; $1980\text{--}1463 \text{ cm}^{-1}$ oralig‘i sirtning murakkab kimyoviy holatini aks ettiruvchi umumiy spektral soha sifatida ehtiyotkor baholandi. SEM ma‘lumotlari sirtning notekis va qisman aglomeratsiyalangan tuzilishini ko‘rsatdi. EDS nuqtaviy tahlilida C, P va Eu signallari qayd etildi, biroq bu natija namunaning o‘rtacha tarkibini emas, faqat tanlangan lokal sohaning kimyoviy holatini tavsiflaydi. Olingan natijalar Si–Eu tizimida Si-matritsaning ustunligi, sirtga xos Si–H/OH belgilarining mavjudligi va kimyoviy-morfologik notekislikning lokal xarakterini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: Si–Eu tizimi, sirt qatlami, fazaviy holat, sirt kimyosi, XRD, FTIR, SEM, EDS, Si–H bog‘lanishlari, lokal notekislik.

ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ, ИНФРАКРАСНЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИСТЕМЫ SI–EU: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДАМИ XRD, FTIR, SEM И EDS

Аннотация. В статье фазовое состояние, инфракрасные спектральные особенности и морфологическая неоднородность поверхностного слоя системы Si–Eu проанализированы на основе взаимосвязанной интерпретации данных XRD, FTIR, SEM и EDS. По результатам WPPF фазовой основой образца является кубический Si с массовой долей $99,37 \pm 0,07 \%$. Выделенный очень слабый вторичный компонент на уровне $0,63 \pm 0,07 \%$ без дополнительных независимых подтверждений не интерпретировался как достоверно установленная фаза. В FTIR-спектре широкие полосы при 3428 и 3324 cm^{-1} соотнесены с адсорбированной влагой и гидроксильными состояниями, а сигнал при 2113 cm^{-1} — со связями Si–H; область $1980\text{--}1463 \text{ cm}^{-1}$ рассмотрена как общий спектральный признак сложного химического состояния поверхности без жёсткой молекулярной атрибуции. По данным SEM поверхность характеризуется неровной и частично агломерированной морфологией. Точечный EDS-анализ зафиксировал сигналы C, P и Eu, однако этот результат описывает только выбранную локальную область и не характеризует средний состав всего образца. Совокупность полученных данных указывает на доминирование Si-матрицы, наличие поверхностных Si–H/OH-состояний и локальный характер химико-морфологической неоднородности.

Ключевые слова: система Si–Eu, поверхностный слой, фазовое состояние, химия поверхности, XRD, FTIR, SEM, EDS, связи Si–H, локальная неоднородность.

PHASE STATE, INFRARED SPECTRAL FEATURES, AND MORPHOLOGICAL HETEROGENEITY OF THE SURFACE LAYER IN THE SI–EU SYSTEM: A COMPREHENSIVE ANALYSIS BY XRD, FTIR, SEM, AND EDS

Abstract. This study analyzes the phase state, infrared spectral features, and morphological heterogeneity of the surface layer in the Si–Eu system through a correlated interpretation of XRD, FTIR, SEM, and EDS data. WPPF processing showed that the phase basis of the sample is cubic Si with a mass fraction of $99.37 \pm 0.07\%$. A very weak secondary component at the level of $0.63 \pm 0.07\%$ was not interpreted as a reliably established phase in the absence of additional independent confirmation. In the FTIR spectrum, the broad bands at 3428 and 3324 cm^{-1} were associated with adsorbed moisture and hydroxyl-related states, whereas the 2113 cm^{-1} signal was assigned to Si–H bonds; the $1980\text{--}1463\text{ cm}^{-1}$ region was treated as a general indicator of a chemically complex surface state without rigid molecular attribution. SEM data revealed an uneven and partly agglomerated surface morphology. Point EDS analysis detected C, P, and Eu signals; however, this result characterizes only the selected local area and does not represent the average composition of the whole sample. Taken together, the data indicate the dominance of the Si matrix, the presence of surface-related Si–H/OH states, and the local character of the chemical and morphological heterogeneity.

Keywords: Si–Eu system, surface layer, phase state, surface chemistry, XRD, FTIR, SEM, EDS, Si–H bonds, local heterogeneity.

Kirish. Si asosli tizimlarda fazaviy holat, sirt kimyosi va lokal mikrostrukturani ishonchli talqin qilish uchun XRD, FTIR, SEM va EDS usullarini o‘zaro bog‘liq holda qo‘llash muhim metodik yondashuvdir [1–8]. WPPF usuli difraktogrammadagi asosiy kristall fazani aniqlash va juda zaif komponentlarni ehtiyotkor baholash imkonini beradi [1, 2]. FTIR sirt bog‘lanishlari hamda ularning lokal kimyoviy muhitga sezgir belgilarini ochib beradi [3–7]. SEM va EDS esa mos ravishda sirt relyefi hamda tanlangan lokal sohaning element tarkibini tavsiflaydi, biroq bunday ma’lumotlarni butun namuna hajmiga bevosita umumlashtirish metodik jihatdan to‘g‘ri emas [8].

Eu-tutuvchi nitrid, g‘ovak kremniy, kremniy dioksidi (SiO_2) va silikat muhitlarga oid tadqiqotlar europiyning ko‘pincha bir jinsli qattiq eritma sifatida emas, balki lokal koordinatsion markazlar, alohida kimyoviy bog‘lanish muhitlari yoki fazaviy jihatdan farqlanuvchi sohalar bilan bog‘liq holda namoyon bo‘lishini ko‘rsatadi [9–20]. Shu bilan birga, Si asosli Eu-tutuvchi tizimlar bo‘yicha ishlarning katta qismi asosan optik faollik, lyuminessensiya va funksional qo‘llanmalarga qaratilgan bo‘lib, bitta obyekt doirasida strukturaviy-fazaviy asos, sirt bog‘lanishlari va morfologik notekislikni uyg‘un talqin qilish masalasi nisbatan kam yoritilgan [9–20].

So‘nggi sharh va umumlashtiruvchi manbalarda nodir yer elementlari bilan modifikatsiyalangan materiallarda strukturaviy holatni spektral va morfologik natijalar bilan birgalikda baholash zarurligi alohida ta’kidlanadi [21–24]. Biroq aynan bitta Si–Eu namunasi uchun XRD orqali fazaviy asosni, FTIR orqali sirtga xos bog‘lanishlarni hamda SEM/EDS orqali sirt morfologiyasi va lokal kimyoviy notekislikni yagona, ehtiyotkor talqin doirasida ko‘rib chiqadigan ishlar yetarli emas.

Ushbu ishning maqsadi Si–Eu tizimining sirt qatlamida fazaviy holat, sirtga xos kimyoviy belgilar va morfologik notekislikning o‘zaro bog‘liqligini aniqlashdan iborat. Ishning ilmiy yangiligi shundan iboratki, unda natijalar butun namuna bo‘yicha ortiqcha umumlashtirilmasdan, XRD, FTIR, SEM va EDS ma’lumotlari bir-birini to‘ldiruvchi eksperimental belgilar sifatida o‘zaro bog‘liq holda talqin qilindi. Natijada Si matritsasining ustunligi, sirtga xos Si–H/OH holatlari hamda lokal EDS signallarining chegaralangan ma’nosi bitta analitik doirada baholandi; bunda Eu ning butun sirt yoki hajm bo‘ylab taqsimoti haqida qo‘shimcha dalillarsiz qat’iy xulosa chiqarilmadi.

Materiallar va tadqiqot usullari. Tadqiqot ob’ekti sifatida Si–Eu tizimining sirt qatlami tanlandi. Ishning asosiy vazifasi namunaning kristall-fazaviy asosi, sirtga xos kimyoviy bog‘lanishlari hamda lokal morfologik-kimyoviy notekisligini bir-birini to‘ldiruvchi usullar majmuasi yordamida tavsiflashdan iborat bo‘ldi. Shu maqsadda XRD fazaviy asosni, FTIR sirt bog‘lanishlarini, SEM sirt relyefi va mikrorelyefini, EDS esa tanlangan lokal nuqtadagi element tarkibini baholash uchun qo‘llandi [1–8].

Rentgen difraksiya o‘lchovlar MiniFlex 300/600 difraktometrida Cu nurlanishi, 40 kV va 15 mA rejimida, $3\text{--}90^\circ$ (2-teta) oralig‘ida, 0.01° qadam va $10.00^\circ/\text{min}$ skanerlash tezligida bajarildi. Olingan difraktogramma WPPF yondashuvi asosida qayta ishlanib, asosiy kristall faza, ehtimoliy zaif komponentlar va panjara parametrlariga doir ko‘rsatkichlar baholandi [1, 2].

FTIR spektri $4000\text{--}450\text{ cm}^{-1}$ diapazonda qayd etildi. Spektrdagi asosiy minimumlar sirtga xos gidroksil holatlar, adsorblangan namlik va Si–H bog‘lanishlari nuqtayi nazaridan talqin qilindi. Ko‘p ma’noli yoki ustma-ust tushishi mumkin bo‘lgan sohalar uchun FTIRning o‘zi asosida haddan tashqari qat’iy molekulyar identifikatsiya berilmadi [3–7].

SEM tasvirlari JEOL JSM-IT210 elektron mikroskopida SED detektori yordamida, 3.0 kV tezlashtiruvchi kuchlanish, 15.2 mm ishchi masofa va yuqori vakuum rejimida, 60× dan 2700× gacha bo'lgan kattalashtirishlarda olindi. EDS bo'yicha nuqtaviy tahlil 15 kV tezlashtiruvchi kuchlanish, 45× kattalashtirish, 30 s signal yig'ish vaqti hamda 222 CPS hisoblash tezligi sharoitida bajarildi. EDS natijalari namunaning o'rtacha tarkibi sifatida emas, balki tanlangan lokal sohaning element tarkibiga oid cheklangan ma'lumot sifatida talqin qilindi [8].

Metodik jihatdan ushbu ishda uchta muhim cheklov boshidan e'tiborga olindi. Birinchidan, WPPF hisobotida ajratilgan juda kichik ikkilamchi komponent mustaqil faza sifatida faqat qo'shimcha usullar bilan tasdiqlanishi mumkin. Ikkinchidan, FTIRdagi 1980–1463 cm^{-1} oralig'i ko'p ma'noli bo'lishi mumkinligi sababli, ushbu soha faqat ehtiyotkor spektral tavsif darajasida baholandi. Uchinchidan, EDS bitta nuqtaviy tahlilga asoslanganligi uchun undan Eu ning butun sirt yoki hajm bo'ylab taqsimoti haqida qat'iy xulosa chiqarilmadi.

Natijalar va muhokama.

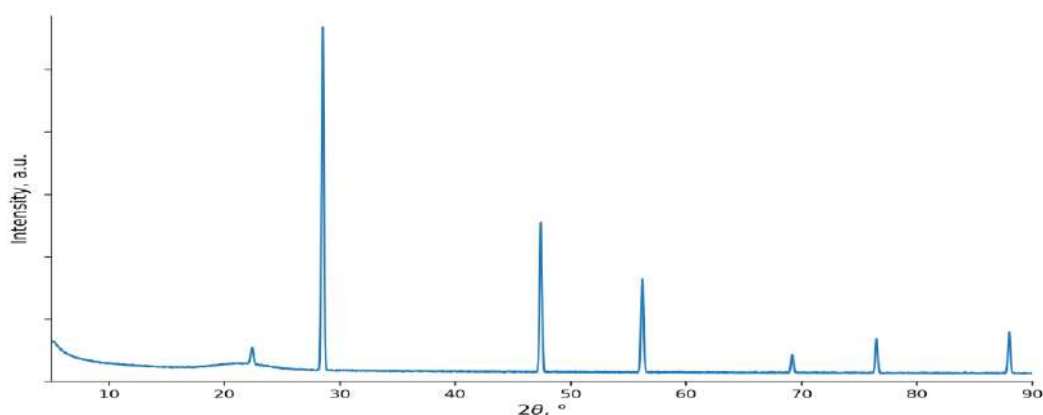
1. XRD bo'yicha fazaviy holat va kristall asosning tavsifi. XRD ma'lumotlarini WPPF yondashuvi asosida qayta ishlash natijasida namunaning fazaviy asosi deyarli to'liq kubik Si ekanligi aniqlandi. Asosiy fazaning massa ulushi $99.37 \pm 0.07\%$ ni, panjara parametri esa $a = b = c = 5.43158 \text{ \AA}$ ni tashkil etdi. WPPF hisobotida bundan tashqari $0.63 \pm 0.07\%$ ulushli juda kichik ikkilamchi komponent ham ajratildi. Biroq uning ulushi nihoyatda past bo'lgani va qo'shimcha mustaqil tasdiqlovchi usullar mavjud emasligi sababli, mazkur komponent ushbu ishda faqat tasdiqlanmagan ikkilamchi signal sifatida baholandi.

Difraktogrammadagi eng intensiv maksimum 2-teta $\approx 28.44^\circ$ da kuzatilib, u Si(111) tekisligiga mos keladi. 47.30° , 56.11° , 69.12° , 76.37° va 88.02° atrofidagi maksimumlar ham kubik Si fazasining asosiy reflekslari bilan mos tushadi. 31.65° yaqinidagi juda kuchsiz chiziqli WPPF orqali ajratilgan tasdiqlanmagan ikkilamchi komponent bilan bog'liq bo'lishi mumkin, ammo bunday zaif signalni yakuniy fazaviy identifikatsiya sifatida qabul qilish uchun yetarli asos yo'q [1, 2]. Asosiy fazaviy ko'rsatkichlar 1-jadvalda, difraktogramma esa 1-rasmda keltirilgan.

Shunday qilib, XRD bo'yicha ishonchli xulosa namunaning Si-matritsasi ustun ekanligidir. Olingan natijalar Eu ning kremniy panjarasiga keng miqyosda bir jinsli kiritilganini to'g'ridan-to'g'ri tasdiqlamaydi; aksincha, Eu bilan bog'liq ehtimoliy holatlar sirtga yaqin yoki lokal kimyoviy farqlanuvchi sohalar bilan bog'liq bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi [9, 10]. Difraktogrammadagi ayrim asosiy maksimumlar 2-jadvalda umumlashtirilgan.

1-jadval. XRD bo'yicha aniqlangan fazaviy tarkib va panjara ko'rsatkichlari

Faza	Massa ulushi, %	$a=b=c$, $\text{\AA}$	Kristall tizimi	Mikrodeformat siya, %
Si	99.37 ± 0.07	5.43158	Kubik	0.0119(9)
Tasdiqlanmagan ikkilamchi komponent (WPPF hisobotiga ko'ra avtomatik ajratilgan)	0.63 ± 0.07	7.98942	Kubik	0.0230(10)



1-rasm. Si-Eu tizimining XRD difraktogrammasi

2-jadval. XRD spektridagi ayrim asosiy maksimumlar

2θ , $^\circ$	d , $\text{\AA}$	(hkl)	Tayinlanishi
----------------------	--------------------	-------	--------------

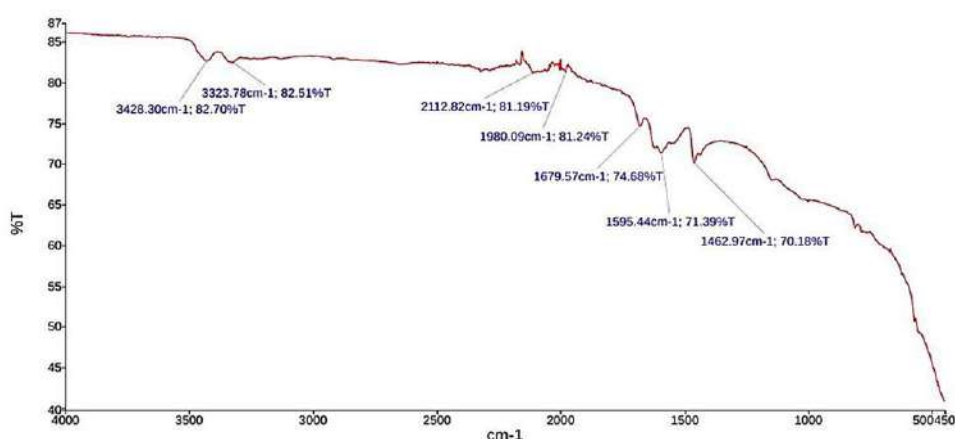
28.43886	3.13593	111	Si fazasining asosiy maksimumi
47.29669	1.92035	220	Si uchun kuchli refleksi
56.11499	1.63768	311	Si kristall panjarasiga mos chiziqli
31.65016	2.82469	220	Tasdiqlanmagan ikkilamchi komponentga taalluqli kuchsiz maksimum

2. FTIR bo'yicha sirt kimyoviy holatining talqini. FTIR spektrida 3428 va 3324 cm^{-1} sohalarida kuzatilgan keng polosalar adsorblangan namlik va gidroksil guruhlar bilan bog'liq deb baholandi. 2113 cm^{-1} dagi nisbatan aniq signal esa Si-H bog'lanishlari uchun xos bo'lgan spektral soha bilan mos keladi [3, 5, 6]. 1980, 1679, 1595 va 1463 cm^{-1} atrofidagi signallar esa qo'shimcha identifikatsiyasiz alohida birikmalarga qat'iy bog'lanmadi va sirtning murakkab kimyoviy holatini ifodalovchi umumiy belgilar sifatida talqin qilindi [4, 7].

FTIR natijalari birgalikda ko'rilganda, namunada kimyoviy jihatdan faol sirt qatlami mavjudligi ko'rinadi. Bunda sirt namligi, gidroksil holatlar va Si-H tipidagi bog'lanishlar ishonchliroq spektral belgilar sifatida namoyon bo'ladi, 1980–1463 cm^{-1} oralig'i esa ehtiyotkor tavsif darajasida qoldiriladi. Shu bois ushbu bo'limning asosiy natijasi sirtning kimyoviy jihatdan murakkab va faol holatini ko'rsatishdan iboratdir. FTIR spektridagi asosiy minimumlar 3-jadvalda, spektrning o'zi esa 2-rasmda keltirilgan.

3-jadval. FTIR spektridagi asosiy minimumlar va ularning ehtiyotkor talqini

ν, cm^{-1}	Signal tavsifi	Adabiyotda uchraydigan mos soha	Izoh
3428; 3324	Keng polosalar	Adsorblangan namlik va/yoki sirt gidroksil guruhlar sohasi	Sirt namligi yoki gidroksil tabiatli guruhlar bilan mos keladi
2113	Nisbatan aniq signal	Si-H cho'zilish tebranishlari uchun xos soha	Si-H bog'lanishlari mavjudligi bilan mos
1980	Kuchsiz signal	Kombinatsion yoki ustma-ust tushgan signallar kuzatilishi mumkin bo'lgan soha	Yakuniy identifikatsiya berilmadi
1679; 1595	O'rta signal	Namlik deformatsion sohasi va ustma-ust signallar	Aniq molekulyar mansublik FTIRning o'zi bilan belgilanmadi
1463	Kuchsiz-o'rta signal	Noaniq sirt signallari kuzatilishi mumkin bo'lgan soha	Ehtiyotkor talqin qilindi, yakuniy identifikatsiya berilmadi



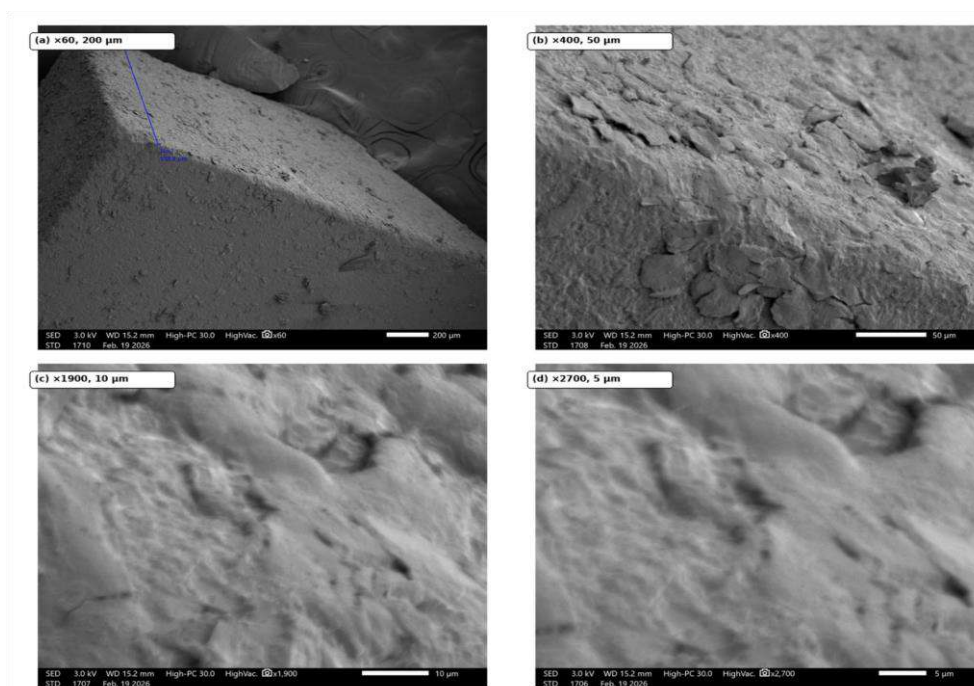
2-rasm. Si-Eu tizimining FTIR spektri

3. SEM va EDS bo'yicha sirt morfologiyasi hamda lokal kimyoviy notekislik. SEM tasvirlarida sirtning bir jinsli emasligi, notekis relyef va ayrim joylarda qisman klasterlangan yoki aglomeratsiyalangan uchastkalar kuzatildi. Bunday morfologiya sirtning shakllanish jarayonlari fazoviy jihatdan bir xil kechmaganini ko'rsatadi. Shu bilan birga, mavjud SEM ma'lumotlari asosida yuqori temperaturali diffuziya

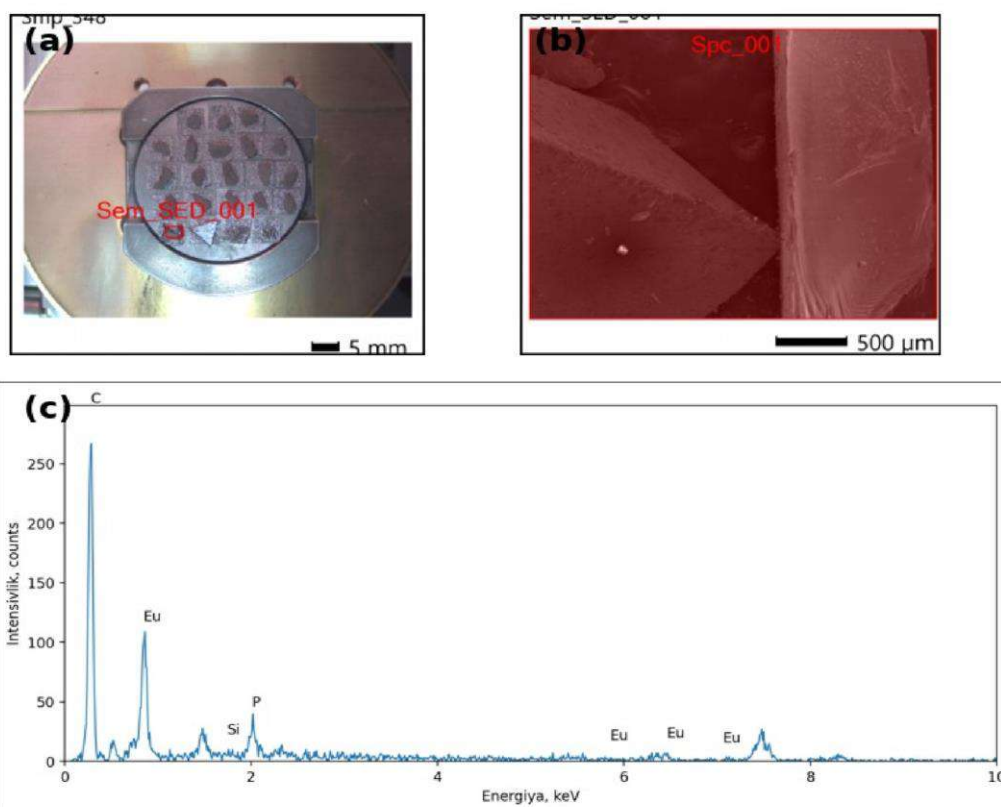
kinetikasi yoki aniq kristallanish mexanizmlari haqida qat'iy hukm chiqarilmadi; ushbu ishda faqat kuzatilgan morfologik notekislik qayd etildi.

EDS nuqtaviy tahlilida C, P va Eu signallari qayd etildi, Si signali esa juda past intensivlikda kuzatildi. Hisoblangan massa ulushlari $91.85 \pm 2.04\%$ C, $0.01 \pm 0.16\%$ Si, $4.16 \pm 0.61\%$ P va $3.97 \pm 1.84\%$ Eu ni tashkil etdi. Bunday nisbatlar butun namunaning o'rtacha tarkibini emas, balki aynan tanlangan lokal nuqtaning kimyoviy xususiyatini aks ettiradi. Ayniqsa, yuqori C ulushi va juda past Si signali mazkur nuqta sirtning tasodifiy lokal qismi, sirt ifloslanishi yoki matritsadan farqlanuvchi mayda uchastka bilan bog'liq bo'lishi ehtimolini inkor etmaydi. Shu sababli ushbu natija Eu ning butun sirt bo'ylab taqsimoti uchun emas, faqat lokal EDS kuzatuvi sifatida talqin qilindi [8].

SEM va EDS natijalari birgalikda talqin qilinganda, sirt qatlamining morfologik va kimyoviy jihatdan bir jinsli emasligi haqida ehtiyotkor, ammo aniq xulosa chiqarish mumkin. Ya'ni, tanlangan hududda Eu va P bilan bog'liq lokal element belgilar qayd etilgan bo'lsa-da, bu holat bitta nuqtaviy EDS tahlili doirasidan tashqariga chiqarilib, butun namuna yuzasi yoki hajmi uchun umumlashtirilmaydi. SEM tasvirlari 3-rasmda, EDS spektri va tanlangan nuqta 4-rasmda, element tarkibi esa 4-jadvalda berilgan.



3-rasm. Si–Eu namunasining turli kattalashtirishlarda olingan SEM tasvirlari



4-rasm. EDS nuqtaviy tahlili: optik ko‘rinish, tanlangan lokal soha va EDS spektri.

4-jadval. Tanlangan EDS nuqtasi bo‘yicha element tarkibi

Element	Spektral chiziq	Massa ulushi, %	Atom ulushi, %
C	K	91.85 ± 2.04	97.94 ± 2.18
Si	K	0.01 ± 0.16	0.00 ± 0.07
P	K	4.16 ± 0.61	1.72 ± 0.25
Eu	L	3.97 ± 1.84	0.33 ± 0.15

Izoh: jadvaldagi qiymatlar faqat tanlangan lokal nuqtaga tegishli bo‘lib, namunaning butun hajmidagi o‘rtacha element tarkibi sifatida talqin qilinmaydi.

Xulosa. Si–Eu tizimining sirt qatlami XRD, FTIR, SEM va EDS usullari yordamida kompleks baholandi. XRD bo‘yicha namunaning fazaviy asosi kubik Si ekani va uning massa ulushi 99.37 ± 0.07 % ni tashkil etishi aniqlandi. WPPF orqali ajratilgan juda kichik ikkilamchi komponent qo‘shimcha tasdiqlovchi ma‘lumotlarsiz mustaqil faza sifatida qabul qilinmadi. FTIR spektrida 3428 va 3324 cm^{-1} sohalaridagi keng polosalar adsorblangan namlik va gidroksil holatlar bilan, 2113 cm^{-1} dagi signal esa Si–H bog‘lanishlari bilan mos kelishi ko‘rsatildi; 1980 – 1463 cm^{-1} oralig‘i esa yakuniy identifikatsiyasiz, sirtning murakkab kimyoviy holatini aks ettiruvchi ehtiyotkor spektral belgi sifatida baholandi. SEM ma‘lumotlari sirtning notekis va qisman aglomeratsiyalangan tuzilishini ko‘rsatdi. EDS nuqtaviy tahlili tanlangan lokal hududda C, P va Eu bilan bog‘liq element belgilarini qayd etdi, biroq bunday natija namunaning o‘rtacha tarkibini yoki Eu ning butun sirt bo‘ylab taqsimotini ifodalamaydi; yuqori C fonli bu lokal kuzatuv sirtning tasodifiy geterogen qismi yoki ifloslanish ta‘sirini ham inkor etmaydi. Shunday qilib, ishning asosiy natijasi Si-matritsa ustun bo‘lgan, kimyoviy jihatdan faol va morfologik jihatdan bir jinsli bo‘lmagan sirt qatlamining ehtiyotkor, ammo o‘zaro mos kompleks tavsifini berishdan iborat.

ADABIYOTLAR:

1. Alam M.A., Ahmed S., Bishwas R.K., Mostofa S., Jahan S.A. X-ray crystallographic diffraction study by whole powder pattern fitting (WPPF) method: Refinement of crystalline nanostructure polymorphs

1. TiO₂. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2025, 51, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.10.010>.
2. Casati N., Boldyreva E. Powder diffraction data beyond the pattern: a practical review. *Journal of Applied Crystallography*, 2025, 58, 1085-1105. <https://doi.org/10.1107/S1600576725004728>.
3. Al-Amin K., Kawsar M., Mamun M.T.R.B., Hossain M.S. Fourier transform infrared spectroscopic technique for analysis of inorganic materials: a review. *Nanoscale Advances*, 2025, 7, 6677-6702. <https://doi.org/10.1039/D5NA00522A>.
4. Ellerbrock R., Stein M., Schaller J. Comparing amorphous silica, short-range-ordered silicates and silicic acid species by FTIR. *Scientific Reports*, 2022, 12, 11708. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15882-4>.
5. Šebera J., Zemen J., Jirásek V., Holovský J., Sychrovský V. FTIR Measurement of the Hydrogenated Si(100) Surface: The Structure-Vibrational Interpretation by Means of Periodic DFT Calculation. *Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(17), 9219-9228. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c11176>.
6. Holovský J., Šebera J., Sychrovský V., Zemen J., De Wolf S., Ballif C. Quantitative analysis of nanorough hydrogenated Si(111) surfaces through vibrational spectral assignment by periodic DFT calculations. *Journal of Physical Chemistry C*, 2022, 126(19), 8278-8286. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c09766>.
7. Hinrichs K., Akhtar F., Buldu-Akturk M., Furchner A., Lauermaun I., Nickel N.H., Rappich J. Advanced IR polarimetry to study morphology and structure of ultrathin films. *Applied Surface Science Advances*, 2025, 30, 100869. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100869>.
8. Ali A., Zhang N., Santos R.M. Mineral Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the Fundamentals, Advancements, and Research Directions. *Applied Sciences*, 2023, 13(23), 12600. <https://doi.org/10.3390/app132312600>.
9. Brik A., Benyahia B., Mahmoudi B. et al. Annealing Effects on Structural Characteristics of Europium Doped Silicon-Rich Silicon Nitride. *Silicon*, 2022, 14, 8417-8425. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01636-w>.
10. Azmi F., Ahammou B., Bhattacharyya P., Mascher P. Optical and Mechanical Properties of Europium-Doped Silicon Nitride Thin Films Deposited by ECR-PECVD with Magnetron Sputtering. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2025, 14(4), 043003. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/adc23e>.
11. Tiour F., Bekhedda K., Mahmoudi B. et al. Optical properties of cerium-doped SiN_x thin films containing silicon nanocrystals. *Applied Physics A*, 2024, 130, 399. <https://doi.org/10.1007/s00339-024-07550-3>.
12. Joo M.H., Park S.J., Jang H.J., Hong S.-M., Rhee C.K., Sohn Y. Enhanced Photoluminescence of Electrodeposited Europium Complex on Bare and Terpyridine-Functionalized Porous Si Surfaces. *Photochem*, 2021, 1(1), 38-52. <https://doi.org/10.3390/photochem1010004>.
13. Ben Zaid M.Y., Enrichi F., Daldosso N., Safonova A., Cassetta M., Mariotto G., Bouaicha M. Energy transfer pathway in europium doped porous silicon. *Materials Research Bulletin*, 2025, 195, 113876. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113876>.
14. Niftaliev S.I., Kuznetsova I.V., Zvereva I.A. et al. Silicon Oxide Modified with Gadolinium and Europium Oxides-Synthesis, Properties and Application Prospects. *Glass Physics and Chemistry*, 2023, 49, 150-159. <https://doi.org/10.1134/S108765962260096X>.
15. Shamseddine H. et al. Europium-Doped Silica Nanoparticles for Efficient and Sustainable Lead Removal from Aqueous Solutions. *Results in Materials*, 2025, 28, 100826. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100826>.
16. Gao F., Zhao X. et al. A Facile Method for the Fabrication of Luminescent Eu³⁺-Doped SiO₂ Nanowires. *Gels*, 2022, 8(5), 286. <https://doi.org/10.3390/gels8050286>.
17. Montes-Bojorquez J.R., Hernández-Negrete O., Esparza-Ponce H.E. et al. Sol-gel synthesis of Eu³⁺ doped silica-gold nanorod composites with tunable optical properties. *RSC Advances*, 2023, 13, 27006-27015. <https://doi.org/10.1039/D3RA04652D>.
18. Woo H.-J., Chung S.-J., Hill M., Kim T. Europium-Doped Calcium Silicate Nanoparticles as High-Quantum-Yield Red-Emitting Phosphors. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(11), 9884-9891. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01547>.
19. Ravi Teja V., Sreenivasulu M., Chavan V.K. Optical Applications of Europium Ion Doped Silicate Glasses: W-LED. *Silicon*, 2024, 16, 3553-3571. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02942-9>.

20. Sreenivasulu M., Chavan V.K., Ravi Teja V. Emission modulation and radiative dynamics in Europium-Doped Borate and silicate glass networks. *Applied Physics A*, 2025, 131, 1019. <https://doi.org/10.1007/s00339-025-09144-z>.
21. Parauha Y.R., Kalyani N.T., Dhoble S.J. Recent trends in rare earth doped luminescent materials: A review. *Journal of Molecular Structure*, 2025, 1347, 143190. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143190>.
22. Kiran R., Kamath N., Sayyed M.I., Almuqrin A.H., Kamath S.D. A review of recent developments in rare earth-doped nanophosphors for emerging technological applications. *RSC Advances*, 2025, 15(25), 20040-20060. <https://doi.org/10.1039/D5RA03126E>.
23. Chen Q., Zhang J., Ye Q., Qin S., Li L., Teng M., Wong W.-Y. Progress in Luminescent Materials Based on Europium(III) Complexes of β -Diketones and Organic Carboxylic Acids. *Molecules*, 2025, 30(6), 1342. <https://doi.org/10.3390/molecules30061342>.
24. Geldasa F.T., Etefa H.F., Dejene F.B. Effect of Europium Doping on the Structural, Morphological, and Luminescent Properties of Y₃Al₅O₁₂ Phosphors Produced by Combustion Method. *Journal of Fluorescence*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10895-025-04319-6>.

KREMNIYNI Ga VA Sb ATOMLARI BILAN KETMA-KET LEGIRLASH VA ULARNING OPTIK XUSUSIYATLARINING MODELI

Raxmanov Ulug'bek Musirmon o'g'li,

University of Business and Science Toshkent filiali
aniq fanlar kafedrası o'qituvchisi

Ashurova Munisa Muxiddinovna,

University of Business and Science Toshkent filiali
aniq fanlar kafedrası o'qituvchisi

Aktamov Muslimbek Azamat o'g'li,

University of Business and Science Toshkent filiali
aniq fanlar kafedrası o'qituvchisi

Gadayev Soxib Abdullayevich,

University of Business and Science Toshkent filiali
aniq fanlar kafedrası o'qituvchisi

Samandaarov Toji Normurodovich,

University of Business and Science Toshkent filiali
aniq fanlar kafedrası o'qituvchisi

Annotatsiya. Mazkur maqolada Ga va Sb atomlarining Kremniyda legirlash jarayonlari va ularning legirlangandan keyingi holat parametrlarining o'zgarishi ko'rib chiqilgan. Olingan natijalar asosida Ga va Sb elementlarining optik parametrlari va kirishma kiritilgan Si ning konsentratsiyasi va solishtirma qarshiligi diffuziya hodisasidan keyin o'zgarib borgan. Kremniy sirtida GaSb binar birikmasi shakllanganligi, uning xajmida xam nafaqat GaSb balki $A^{III}B^V$ yoki $A^{II}B^{VI}$ tipidagi xar qanday binar birikmali yarimo'tkazgichlarni shakllantirish imkoni mavjudligiga dalolat bo'ladi. Kremniyning kristall panjara doimiysiga juda yaqin $a=5.4094 \text{ \AA}$ (Xatoligi: -0.53%). 1⁻pikning tajriba natijalari yordamida hisoblab topilgan kristall panajara doimiysi $a=6.19 \text{ \AA}$, adabiyotlarda keltirilgan GaSbning kristall panjara doimiysiga juda yaqin $a=6.0959 \text{ \AA}$ (Xatoligi: 1.5%).

Kalit so'zlar: diffuziya, klaster, kristall, atom, chastota, konsentratsiya, $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, taqiqlangan zona, spektr, o'tkazuvchanlik.

МОДЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ АТОМАМИ GA И SB И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Аннотация. В данной статье рассмотрены процессы легирования кремния атомами Ga и Sb, а также изменения параметров состояния после легирования. На основе полученных результатов установлено, что оптические параметры элементов Ga и Sb, а также концентрация примесей и удельное сопротивление кремния изменяются после процесса диффузии. Обнаружено, что на поверхности кремния формируется бинарное соединение GaSb, что свидетельствует о возможности образования в его объёме не только GaSb, но и любых бинарных полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ или $A^{II}B^{VI}$. Постоянная кристаллической решётки кремния очень близка и составляет $a = 5.4094 \text{ \AA}$ (погрешность: -0.53%). По результатам эксперимента (1-й пик) была рассчитана постоянная кристаллической решётки $a = 6.19 \text{ \AA}$, что близко к значению, приведённому в литературе для GaSb — $a = 6.0959 \text{ \AA}$ (погрешность: 1.5%).

Ключевые слова: диффузия, кластер, кристалл, атом, частота, концентрация, $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, запрещённая зона, спектр, проводимость.

MODEL OF SEQUENTIAL DOPING OF SILICON WITH Ga AND Sb ATOMS AND THEIR OPTICAL PROPERTIES

Abstract. This article examines the processes of doping silicon with Ga and Sb atoms and the changes in the parameters of their state after doping. Based on the obtained results, it was found that the optical parameters of Ga and Sb elements, as well as the concentration of impurities and the resistivity of doped silicon, change after the diffusion process. It was observed that a GaSb binary compound is formed on the

surface of silicon, which indicates the possibility of forming not only GaSb but also any binary semiconductor compounds of the $A^{III}B^V$ or $A^{II}B^{VI}$ type within its volume. The lattice constant of silicon is very close to $a = 5.4094 \text{ \AA}$ (error: -0.53%). According to the experimental results of the first peak, the calculated lattice constant is $a = 6.19 \text{ \AA}$, which is very close to the value reported in the literature for GaSb, $a = 6.0959 \text{ \AA}$ (error: 1.5%).

Keywords: diffusion, cluster, crystal, atom, frequency, concentration, $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, band gap, spectrum, conductivity.

Kirish. Kremniy zamonaviy elektronika va fotovoltaikaning asosiy materiallaridan biridir. Kremniyning bir qator muhim afzalliklariga qaramay, masalan, dunyodagi katta zaxiralar va ishlab chiqilgan texnologiyalarning yuqori darajasi, yarimo'tkazgich materialining tozaligi uchun cheklovlar mavjud. Bu kremniyning asosiy parametrlari, ya'ni taqiqlangan zona kengligining kichik qiymati, tartibsiz tarmoqli bo'shlig'i va zaryad tashuvchilarning past harakatchanligi bilan bog'liq, bu esa infraqizil spektral sohasida luminesans xususiyatlarining yo'qligi va past yutilish koeffitsientiga olib keladi. Shuning uchun kremniyning asosiy parametrlarini nazorat qilish, ya'ni kremniy asosidagi yangi materiallarni ishlab chiqish, bu kamchiliklarni bartaraf etish va $A^{III}B^V$ yarimo'tkazgich birikmalarining parametrlarini material parametrlariga yaqinlashtirish uchun texnologik yechimlarni ishlab chiqish zarur.

Shu munosabat bilan kremniy panjarasidagi III va V guruh elementlarining o'zaro ta'sirini o'rganish katta amaliy qiziqish uyg'otadi. Ushbu o'zaro ta'sir natijasida tuzilmalarning tabiatiga o'xshash turli xil klasterlar, binar va murakkabroq nanoklasterlarni shakllantirish mumkin. Bundan tashqari, III va V guruh elementlarining ($N \geq 10^{20}-10^{21} \text{ sm}^{-3}$) juda yuqori eruvchanligi tufayli kremniyning energetik tuzilishiga sezilarli ta'sir ko'rsatadigan yetarlicha yuqori konsentratsiyani kiritish mumkin. Diffuziya jarayonini yaxshi nazorat qilish (juda past diffuziya koeffitsiyenti tufayli) kristall yuzasida ham, yuzasida ham klasterlar hosil bo'lishiga imkon beradi.

Ma'lumki, III va V guruh elementlari kremniyning taqiqlangan zonasida donor va akseptor darajalarini hosil qiladi va shuning uchun zaryadlangan ionlar shaklida bo'lib, ular atrofiga Kulon potentsial maydonini yaratadi, bu tizimning erkin energiyasini sezilarli darajada oshiradi.

Kremniydagi III va V guruh elementlarining fizik, kimyoviy va diffuziya parametrlarini hisobga olgan holda olib borgan tahlilimiz shuni ko'rsatdiki, kremniy panjarasida eng yuqori barqarorlikka ega bo'lgan III va V guruh elementlarining ba'zi juftlari mavjud bo'lib, ulardan biri. Ga va Sb juftligi. Shuning uchun bu ishning maqsadi kremniy kristlida Ga va Sb atomlarini diffuziya usulida kiritib hosil bo'lgan natijaviy moddaning taqiqlangan zonasini o'rganishdan iborat. Bu ishning matematik modelini 2 ta holat uchun ishlab chiqamiz.

- Kremniyga Ga va Sb ni ketma-ket diffuziyasi,
- Kremniyga Ga va Sb ni bir-vaqtda diffuziyasi.

Avval biz kremniyga Ga va Sb ni ketma-ket diffuziyasini ko'rib chiqamiz buning uchun biz boshlang'ich material sifatida KEF-1 kremniy namunasi tanlangan, diffuziyadan oldin namunalar yuzasi olmos pastasi bilan optik jilolangan (M-0,5). Diffuziya jarayoni ikki bosqichda amalga oshirildi. Namunalar to'rt guruhga bo'lingan:

I guruh.

Birinchi bosqichda KEF-1 materiali 1 soat davomida 1200°C haroratda issiqlik bilan ishlov berishdan o'tkazildi. Ikkinchi bosqichda bu namunalar 1 soat davomida 1250°C haroratda qayta qizdirildi.

II guruh.

Birinchi bosqichda galliy 1 soat davomida 1200°C haroratda diffuziya qilinadi. Ikkinchi bosqichda bu namunalar 1 soat davomida 1250°C haroratda qayta qizdirildi.

III guruh.

Birinchi bosqichda KEF-1 materiali 1 soat davomida 1200°C haroratda issiqlik bilan ishlov berishdan o'tkazildi. Ikkinchi bosqichda surma bu namunalarga 1 soat davomida 1250°C haroratda diffuziya qilinadi.

IV guruh.

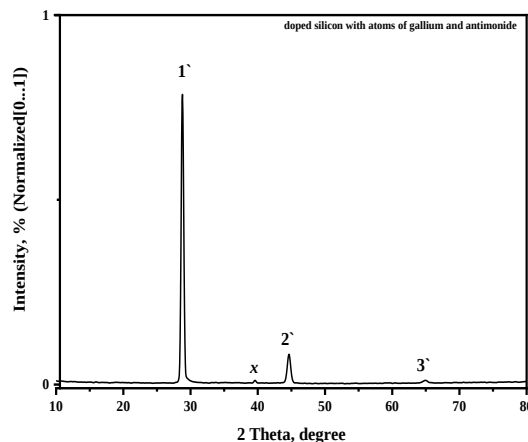
Birinchi bosqichda galliy 1 soat davomida 1200°C haroratda diffuziya qilinadi. Ikkinchi bosqichda surma bu namunalarga 1 soat davomida 1250°C haroratda diffuziya qilinadi.

Diffuziyadan so'ng, olingan namunalarning o'tkazuvchanligi terma zond yordamida o'lchandi. II guruh namunalari p-tipi, I, III va IV guruh namunalari esa n-tipi o'tkazuvchanlikka ega ekanligi aniqlangan. Namunalarni mexanik ishlov berishdan so'ng ularning qalinligi aniqlandi: I guruh $d = 0,09 \text{ sm}$, II guruh $d = 0,076 \text{ sm}$, III guruh $d = 0,081$ va IV guruh $d = 0,081 \text{ sm}$.

Namunalarning optik xususiyatlari FSM-1202 infraqizil Fyurje spektrometri yordamida o'rganildi (1-

rasm).

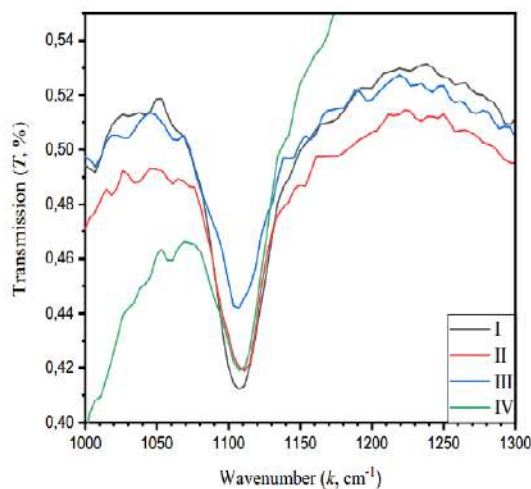
1-rasmdan ko'rinib turibdiki, 4 ta namunaning optik xususiyatlari bir-biridan farq qiladi o'tkazish chastotasi va intensivligiga bog'liq. Dastlabki materialning I-spektri KEF-1, I-spektr II guruh namunasi, 1-spektr III guruh namunasi, IV guruh namunalarning spektr spektral tasnifi IV.



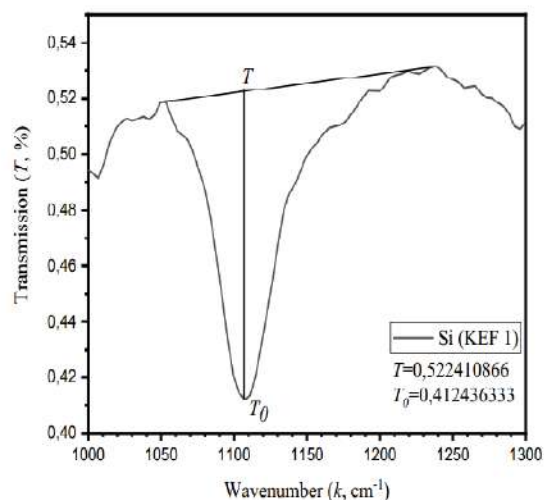
1-rasm: Namunalarning yutilish spektri

2.4.3-rasm: I guruh namunasi spektriga ko'ra diffuziya qilinganda kislorod konsentratsiyasini hisoblash (T - kislorod spektrining maksimal intensivligi, T_0 - kislorod spektrining eng past intensivligi)

Ma'lumki, kislorodning yutilish spektri 1106 cm^{-1} to'lqin uzunligiga to'g'ri keladi. 1-rasmdagi namunalarning kislorod spektrlaridan foydalanib, biz kislorod konsentratsiyasini hisoblaymiz:



1 - rasm



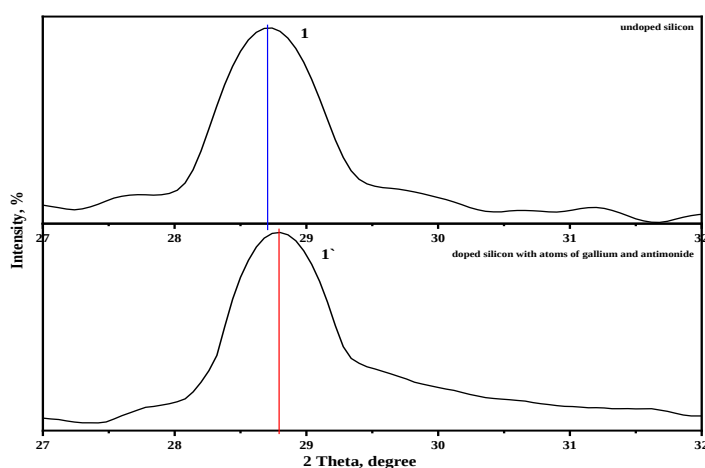
2 - rasm

	T	T_0	$d, \text{ cm}$
$Si \text{ (KEF 1)}$	0,522410866	0,412436333	0,09
$Si<Ga>$	0,50008489	0,419524618	0,076
$Si<Sb>$	0,518336163	0,442190153	0,081
$Si<Ga, Sb>$	0,484634975	0,419736842	0,081

$$N_o = 3.03 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{d} \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \text{ cm}^{-3} \quad [1]$$

$$N_o^I = 3.03 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{0.09} \cdot \ln \left(\frac{0.522410866}{0.412436333} \right) = 7.95787 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_o^I \approx 7.96 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}; N_o^{II} \approx 7.00 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}; N_o^{III} \approx 5.94 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}; N_o^{IV} \approx 5.37 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$



3-rasm. Galliy va surma atomlari bilan ligerlangan kremniy

Ko'rinib turibdiki, 1-guruh namunasida 3ta asosiy piklar aniqlangan 1-pik $2\theta=28.71$ degree diapozonida Si (111) yo'nalishdagi qiymatiga to'g'ri keldi, 2-pik va 3-pik mos ravishdagi $2\theta=44.6$ degree va $2\theta=65.6$ degree SiC tegishli piklardir. 3-rasmda esa kremniyga tegishli asosiy 1-pik intensivligi o'zgarmagan lekin 2' va 3' piklarning intensivligi kamaygan. Bundan tashqari 4-rasm nomalum x-pik aniqlangan $2\theta=39.8$ degree. Bu pik Sb yoki SbO_2 pik bo'lishi mumkin.

1-pik va 1'-pik kremniyga tegishli piklarni chuqurroq o'rganganimizda 1'-pik $2\theta=28.79$ ga siljiganligi aniqlandi

Ushbu grafiklardagi piklarning parametrlari Gauss usuli yordamida aniqlandi

	$2\theta, \text{ degree}$	$\theta, \text{ degree}$	FWHM	Height	h	k	l
Si (1-pik)	28.6112	14.31	0.57501	0.78359	1	1	1
Si/GaSb (1'-pik)	28.79138	14.4	0.43262	0.79021	2	0	0

1-jadval hamda 1 va 2 formulalar yordamida 1-pikni kremniyning piki deb, 1-pikni GaSbning piki deb difraksiyon panjara doimiysi va kristall panjara doimiysini hisoblab chiqildi

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sin(\theta)} \quad (1)$$

$$a = d_{hkl} \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2)$$

bu yerda d_{hkl} – difraksiyon panjara doimiysi, a – kristal panjara doimiysi, hkl – kristal panjara yo'nalishi (Miller indexsi), θ – nurning tushish va qaytish burchagining yarmiga teng burchak.

	$d_{hkl}, \text{\AA}$	$a, \text{\AA}$	Reserve
1-pik (Si)	3.106	5.38	5.4094
1`-pik (GaSb)	3.0983	6.19	6.0959

Xulosa. Natijalarning o'zgarishi diffuziya jarayoni bilan bog'liq bo'lganligi sababli, quyidagi xulosalar chiqarish mumkin. Taxmin qilish mumkinki, galliy atomlarini dastlabki kremniy moddasiga diffuziya qilganda 1106 sm^{-1} chastotada cho'qqining pasayishi va surma atomlarining boshlang'ich tarkibiga qo'shilishi bilan 1106 sm^{-1} chastotada cho'qqining pasayishi, kremniy moddasi kremniydagi ushbu spektrga mos keladigan yutilish markazlarining neytrallanishiga olib keladi. Biroq, har ikki elementning ketma-ket tarqalishi bilan 1106 sm^{-1} chastotada cho'qqining yanada pasayishi kislorod ta'sirida galliy va surma atomlari konsentratsiyasining oshishini anglatadi.

ADABIYOTLAR:

1. M. K. Bakhadyrhanov, U. X. Sodikov, Kh. M. Iliev, S. A. Tachilin, Tuerdi Wumaier. *Materials Physics and Chemistry*, 1, 89 (2019).
2. Pranav Kumar Asthana. 2015. *High performance 20 nm GaSb/InAs junctionless tunnel field effect transistor for low power supply. Journal of Semiconductors* 36 (2) 024003 1-6.
3. Xue-Yue Xu, Jun-Kai Jiang, Wei-Qiang Chen, Su-Ning Cui, Wen-Guang Zhou, Nong Li, Fa-Ran Chang, Guo-Wei Wang, Ying-Qiang Xu, Dong-Wei Jiang. 2022. *Wet etching and passivation of GaSb-based very long wavelength infrared detectors. Chinese Physics B* 31 (6).
4. V. P. Khvostikov, S. V. Sorokina, O. A. Khvostikova, N. Kh. Timoshina, N. S. Potapovich, B. Ya. Ber, D. Yu. Kazantsev, and V. M. Andreev. *High Efficiency GaSb Photocells. PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES. Semiconductors*, 2013, Vol. 47, No. 2, pp. 307–313.
5. J.B. Rodriguez, K. Madiomanana, L. Cerutti, A. Castellano, E. Tournié. *X-ray diffraction study of GaSb grown by molecular beam epitaxy on silicon substrates. Journal of Crystal Growth* 439 (2016) 33–39.
6. E.A. Chusovitin, D.L. Goroshko, S.A. Dotsenko, S.V. Chusovitina, A.V. Shevlyagin, N.G. Galkin, A.K. Gutakovskii. *GaSb nanocrystals grown by solid phase epitaxy and embedded into monocrystalline silicon. Scripta Materialia* 136 (2017) 83-86.

PBB-TSD:IT-4F VA PBB-TSA:IT-4F TARKIBGA EGA BO'LGAN FAOL QATLAMLAR ASOSIDAGI QUYOSH ELEMENTLARINING XOSSALARI

Saparbayev Aziz Adamovich,

U.A. Arifov nomidagi Ion plazma va Lazer texnologiyalari instituti yetakchi ilmiy xodimi
saparbaevaziz83@gmail.com

Shukurullayeva Mohira O'ktam qizi,

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti magistranti
mohirakhan777@gmail.com

Sharopova Gulruxsor Mashrab qizi,

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti, magistranti
sharopovagulruxsor18@gmail.com

Annotatsiya. Yangi PBB-TSA va PBB-TSD donორlarni, PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F prekursorlarni eritma holatida va yupqa qatlam holatida yutilish spektrlarini tadqiq qilish. Ushbu faol qatlamlar asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlarini optik va strukturaviy xossalari bilan qiyosiy o'rganildi. IT-4F:PBB-TSD va IT-4F:PBB-TSA tarkibli polimer quyosh elementi qizdirilganda optik yutilish intensivligi va energiya o'zgarish samaradorligining oshishiga faol qatlamning stukturaviy tartiblanish darajasining hamda hajmiy geterostrukturada zaryad harakatchanligining yaxshi bo'lishi aniqlandi.

Vaqt o'tishi bilan IT-4F:PBB-TSD va IT-4F:PBB-TSA polimer quyosh elementlari optik va fotovoltaiik parametrlarining o'zgarishlari orasidagi o'zgarishlari orasidagi bog'liqlik aniqlandi hamda ushbu parametrlari yordamida ularning degradatsiya darajasini bevosita nazorat qilish imkoniyati mavjudligi ko'rsatildi.

IT-4F asosida optimallashtirilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamli polimer quyosh elementlari 0,89 V ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}), 21,9 mA/cm² qisqa tutashuv toki zichligi (J_{sc}) va 74,5% to'ldirish koeffitsiyenti (FF) bilan 14,6% samaradorligini erishildi.

Kalit so'zlar: PBB-TSD, PBB-TSA, IT-4F, PQE, TKS, donor, akseptor.

PROPERTIES OF SOLAR CELLS BASED ON ACTIVE LAYERS WITH THE COMPOSITION PBB-TSD:IT-4F AND PBB-TSA:IT-4F

Abstract. The optical absorption spectra of new PBB-TSA and PBB-TSD donors, as well as PBB-TSA:IT-4F and PBB-TSD:IT-4F precursors, were investigated in solution and thin-film states. The photovoltaic parameters of polymer solar cells (PSCs) based on these active layers were comparatively studied in relation to their optical and structural properties. For polymer solar cells with IT-4F:PBB-TSD and IT-4F:PBB-TSA compositions, it was found that upon heating, the increase in optical absorption intensity and power conversion efficiency is due to the improved degree of structural ordering in the active layer and better charge mobility in the bulk heterostructure.

A correlation was established between the changes over time in the optical and photovoltaic parameters of IT-4F:PBB-TSD and IT-4F:PBB-TSA polymer solar cells, and it was demonstrated that these parameters can be used to directly monitor the degree of their degradation.

For optimized polymer solar cells based on IT-4F with a PBB-TSD:IT-4F active layer, a power conversion efficiency of 14.6% was achieved, with an open-circuit voltage (V_{oc}) of 0.89 V, a short-circuit current density (J_{sc}) of 21.9 mA/cm², and a fill factor (FF) of 74.5%.

Key words: PBB-TSD, PBB-TSA, IT-4F, PSC, EQE, donor, acceptor.

СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ СЛОЁВ С СОСТАВОМ PBB-TSD:IT-4F И PBB-TSA:IT-4F

Аннотация. Спектры оптического поглощения новых доноров PBB-TSA и PBB-TSD, а также прекурсоров PBB-TSA:IT-4F и PBB-TSD:IT-4F были исследованы в растворе и в тонкоплёночном состоянии. Фотовольтаические параметры полимерных солнечных элементов (ПЭС) на основе этих активных слоёв были сравнительно изучены во взаимосвязи с их оптическими и структурными свойствами. Для полимерных солнечных элементов с составами IT-4F:PBB-TSD и IT-4F:PBB-TSA

было установлено, что при нагревании увеличение интенсивности оптического поглощения и эффективности преобразования энергии обусловлено повышением степени структурной упорядоченности активного слоя и улучшением подвижности зарядов в объёмной гетероструктуре.

Была установлена корреляция между изменениями во времени оптических и фотовольтаических параметров полимерных солнечных элементов IT-4F:PBB-TSD и IT-4F:PBB-TSA, и показано, что эти параметры могут быть использованы для непосредственного контроля степени их деградации.

Для оптимизированных полимерных солнечных элементов на основе IT-4F с активным слоем PBB-TSD:IT-4F была достигнута эффективность преобразования энергии 14,6% с напряжением холостого хода (V_{OC}) 0,89 В, плотностью тока короткого замыкания (J_{SC}) 21,9 мА/см² и фактором заполнения (FF) 74,5%.

Ключевые слова: PBB-TSD, PBB-TSA, IT-4F, ПСЭ, ВКЭ, донор, акцептор.

Kirish. Konjugatsiyalangan yangi polimer asosli PQElarni tayyorlash usullaridan eng muvaffaqiyatli strategiya bu donor-akseptor fazalarining aralashmasini qo'llashdir. Donor-akseptor aralashmali konjugatsiyalangan polimerlar katta afzalliklarga ega bo'lib, ularga qo'yiladigan eng birinchi talablardan biri bu yorug'lik energiyasini yutilish koeffitsiyenti yuqori bo'lishi va shu bilan birga keng yutilish spektr sohasiga ega bo'lishi kerak. Bu talabni bajara oladigan donor va akseptor polimerlar juda ko'plab sintez qilinmoqda. Ammo keyingi muammo donor bilan akseptorlarning yutilish spektr sohasi bir-birini to'ldirishi PQElarning samaradorligi uchun juda muhim parametrlardan biridir. Keyingi bosqichlarda esa polimerlarning optimal va osongina sozlanishi mumkin bo'lgan energetik sathga egaligi, natijada akseptorlarga yoki donorlarga mos keladigan ko'proq donor yoki akseptor polimerlarni olishni ta'minlash vazifasi turadi. Shu sababli, zaryadlarni ajratish va tashishni osonlashtiradigan yaxshilangan zaryad harakatchanligiga ega donor va akseptor polimerlar PQElarning samaradorligini ta'minlaydi[1,2].

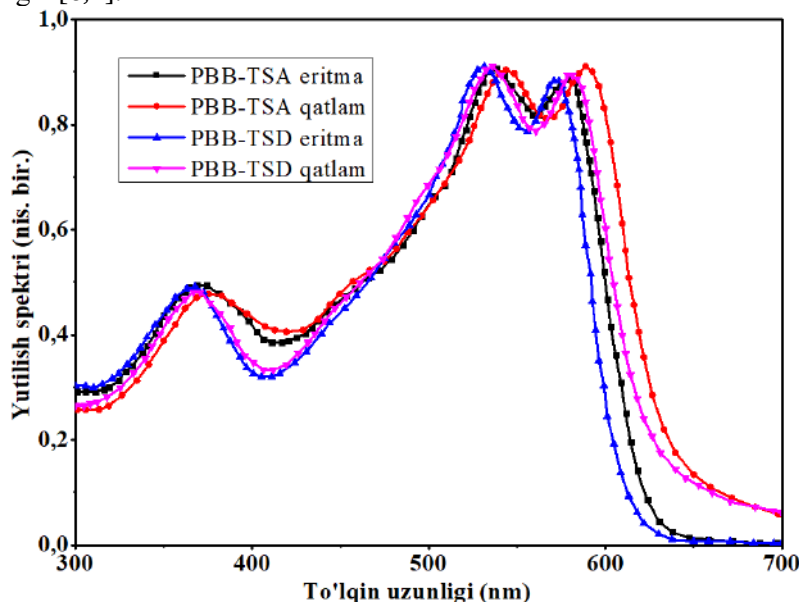
Organik yarimo'tkazgichlarga asoslangan fotovoltaik texnologiyalar, xususan polimer asosidagi quyosh elementlari (Polymer Solar Cells, Polimer quyosh elementlar), so'nggi o'n yilliklarda materialshunoslik, fotofizika, kimyo va nanoenergetika sohalarida keskin rivojlanayotgan yo'nalishdir. Ularning fizikaviy xossalari molekulyar darajadagi elektron tuzilma, morfologiya, zaryad tashish mexanizmlari, rekombinatsiya jarayonlari, optik orbitallarning energetik farqlari va interfeys fizikasi bilan belgilanadi. Quyida PQElarning asosiy fizikaviy xossalari batafsil yoritiladi[3].

Optik xossalari-yorug'lik yutilish va spektral xossalari. Polimerlar π -konjugatsiyalangan zanjirlardan tashkil topgan bo'lib, ular π - π^* o'tishlari orqali quyosh spektrining keng qismida yutilish ko'rsatadi va bu donor polimerlar 300–900 nm to'lqin uzunligini, (donor polimerlar), fullerenga asoslanmagan akseptorlar esa 500–1100 nm to'lqin uzunligidagi nurlanishlarni yutadi. Demak, polimer quyosh elementlari yuqri yutilish xossasiga ega. Shuningdek polimer quyosh elemntlarida dielektrik konstanta nisbatan past va bu eksitonning Kulon tasirlashuvini oshiradi. Shuningdek Polimer quyosh elementlar ning yana bir fizik xususiyatlaridan biri bu eksiton diffuziya uzunligi bo'lib, bu **eksiton o'z umri davomida (τ) polimer yoki gibrud fotoaktiv qatlam ichida erkin harakatlanib o'ta oladigan o'rtacha masofa** buning qiymati 3-10 nm atrofida bo'ladi. Polimer quyosh elementlar ning yana bir fizik parmetrlaridan biri bu zaryad tashuvchanlikdir, uning qiymati odatda 10^{-7} - 10^{-3} cm²/V·s oralig'ida bo'ladi. Yana bir muhim parametrlaridan biri bu energiya darajaridir (HOMO va LUMO darajalaridir), donor LUMO va akseptor LUMO orasida 0,1–1,4 eV diapazonida bo'lsa, eksiton dissotsiatsiyasi asosan samarali bo'ladi[8].

Bundan tashqari, Polimer quyosh elementlar donor va akseptor sifatida ishlatiladigan materiallar bir vaqtning o'zida bir nechta shartlarni bajarishi talab qilinadi. Quyosh nurning keng spektridagi energiyani samarali yutish uchun donor polimerining HOMO va LUMO molekulyar orbitallari orasidagi taqiq soha tor bo'lishi kerak. Organik aralashmada donor va akseptor materiallarining yaxshi aralashuvchanligi, shuningdek aralashmani qayta ishlanishini va uning morfologiyasiga ta'sir ko'rsatadigan tarkibiy moddalarning yetarlicha aralashishi talab qilinadi. Bu shartlardan tashqari, zaryad tashuvchilarning yuqori harakatchanligini ta'minlovchi polimer zanjiri yo'nalishida harakatlanish muhim shart hisoblanadi. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi aralashmaning ichidagi polimer zanjiri yo'nalishi va makromolekulalar joylashishini o'zlari qaytadan tashkil etishiga bog'liq. Kimyogarlal, hozirgi vaqtda, polimerlarga birlashtirilgan yon zanjirlar yoki kichik molekulalarning kimyoviy tuzilishini boshqarish orqali ularni bunday o'zini qaytadan tashkil etishga ta'sir ko'rsatuvchi mexanizmlarni topganlar. Ushbu strategiya asosida ko'plab yangi istiqbolli organik materiallar ishlab chiqilgan[4,5].

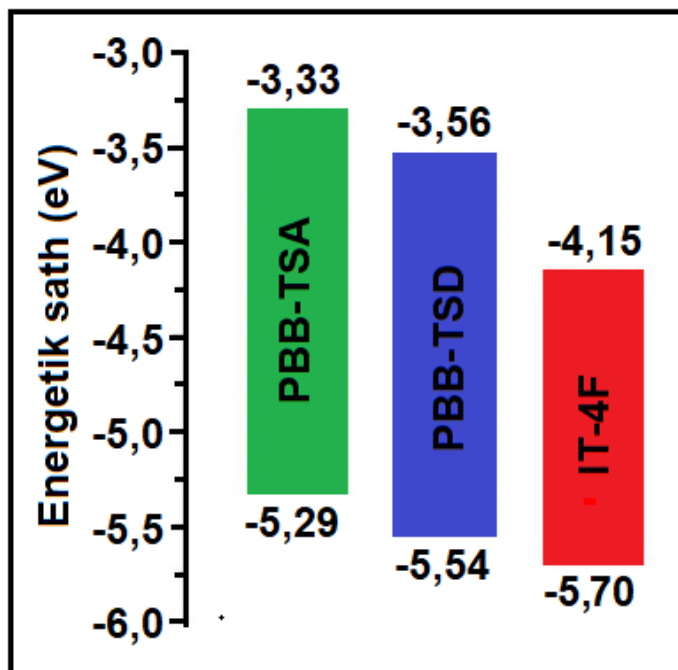
Natijalar va muhokamalar. 1-rasmda yangi PBB-TSA va PBB-TSD polimerlarning yorug'lik yutilish spektrlari ko'rsatilgan. PBB-TSA uchun 375 nm va 368 nm da joylashgan intensiv yutilish cho'qqisi

PBB-TSD uchun konjugatsiyalangan π - π^* bog'larning o'tishlari uchun ahamiyatlidir. PBB-TSA uchun 543 va 589 nm va PBB-TSD uchun 538 va 578 nm bo'lgan yorug'lik yutilish piklari bilan birga 450 nm to'lqin uzunligidan katta bo'lgan yorug'lik to'lqin uzunligi yutilish diapazonlari donor (BDT) va akseptor (BBT) birliklari o'rtasidagi kuchli molekulyar zaryad o'tkazuvchanliga bog'liqligi bilan tushintirish mumkin. Ikkala polimerning eritmasi orqali olingan spektrlarning yelka piklari kuchli agregatsiya harakatini ko'rsatadi. Kvars shisha ustiga yotqizilgan polimer qatlamlarning yutilish spektrining intensivligi va shakli eritmadagiga o'xshash yutilish spektrini ko'rsatadi, ammo yupqa polimer qatlamlarda maksimal yutilish to'lqin sohasida qizil siljishi hosil bo'lgan[6,7].



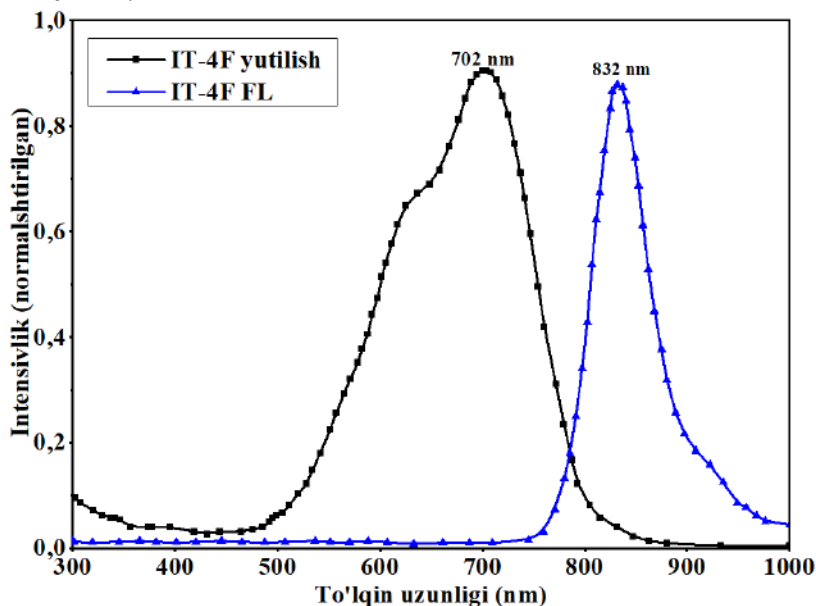
1-rasm. PBB-TSA va PBB-TSD donor polimerlar eritmalarining va kvars shisha ustiga yotqizilgan qatlamlarining yutilish spektrlari

Bu shuni anglatadiki, polimer eritma qattiqlashganda, ya'ni amorf holatga o'tganda π - π^* magistral tomonidan qo'zg'atilgan zanjirlararo agregatsiya strukturasi mavjud bo'lib molekular eritmadagiga nisbatan zichroq va tartibliroq joylashganligi bilan tushuntiriladi[18]. PBB-TSD va PBB-TSA polimerlarning optik taqiqlangan soha kengligi mos ravishda 1,98 va 1,96 eV deb hisoblangan, bu BBT asosidagi polimerlarni keng optik taqiqlangan soha kengligi mos donor materiallari uchun afzal bo'lgan tanlovlardan biriga aylantiradi[9,10].



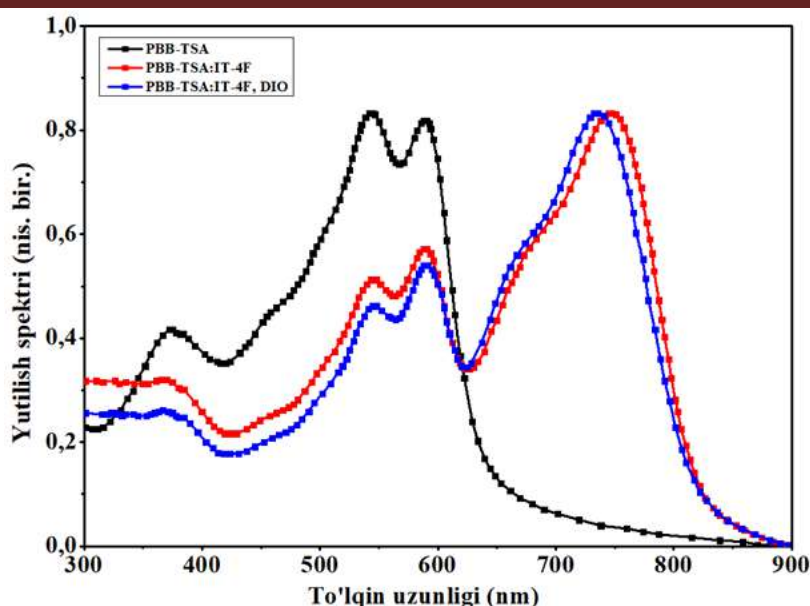
2-rasm. PBB-TSA va PBB-TSD donor polimerlarning va IT-4F akseptorning energiya sath qiymatlari

PBB-TSA va PBB-TSD uchun LUMO va HOMO energiya darajalari siklik voltametriya (CV) yordamida o'Ichandi va natijalar 3.1.2-rasmida keltirilgan. PBB-TSA va PBB-TSD uchun HOMO/LUMO qiymatlari mos ravishda -5,29/-3,33 va -5,54/-3,56 eV. Ikkala polimer ham IT-4F (-5,70 eV) bilan optimal energiya sathlarini hosil qilishi mumkin.



3-rasm. IT-4F akseptor polimer qatlamning yutilish va FL spektri

3-rasmida fullerensiz akseptor IT-4F ning yutilish va FL spektrlari berilgan bo'lib, IT-4F ning yutilish spektrini tahlil qiladigan bo'lsak, yutilish to'lqin uzunligi sohasi 500 nmdan 800 nmgacha ekanligini, bu esa PBB-TSA va PBB-TSD donor polimerlarning yutilish spektri sohasini to'ldirib kengaytirishini anglashimiz mumkin. Chunki donorlarning yutilish spektri to'lqin uzunligi sohasi 400 nmdan 600 nm gacha ekanligini IT-4F akseptor esa 500 nmdan 800 nmgacha yutilish spektriga ega va bu donor va akseptor aralashmasidan tayyorlangan faol qatlamlarning yutilish spektrining to'lqin uzunligi sohasi ancha keng bo'lishini ta'minlaydi. Bu esa o'z o'zidan PQElarning fotovoltaiik parametrlarining samaradorligi oshishiga olib keladi. Fullerensiz akseptor IT-4F ning FL spektrini tahlil qiladigan bo'lsak, FL spektrining maksimumi 800 nm atrofida ko'rinadi. Bu, akseptorning qayta chiqishi vaqtida energiya yo'qotishining minimal bo'lishini anglatadi. FL spektrining intensivligi, yutilish spektriga nisbatan pastroq bo'lishi mumkin, bu esa akseptorning fotonlarni qanchalik samarali chiqarayotganini ko'rsatadi[11, 12]. IT-4F akseptorining yutilish va FL spektrlarini tahlil qilish, uning samaradorligini, energiya yo'qotish mexanizmlarini va potentsial kamchiliklarini aniqlash uchun zarurdir. Optimal ishlash uchun ushbu spektrlar o'rtasidagi munosabatlarni chuqur o'rganish muhimdir va shu sababli fullerensiz akseptorlarni turli xil donorlar bilan faol qatlamlar tayyorlanib yutilish va FL spektrlari tadqiqot qilinishi PQElarning samaradorligini oshirishga xizmat qiladi[13,14].

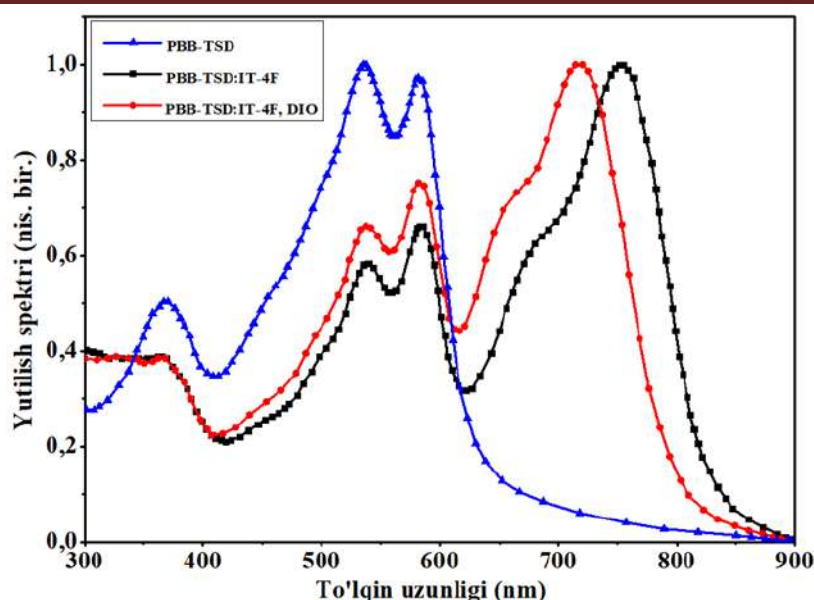


4-rasm. Turli sharoitda olingan PBB-TSA:IT-4F faol qatlamlarning yutilish spektrlari

4-rasmda PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning va PBB-TSA:IT-4F eritmasiga DIO qo'shimchasi kiritilgan PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning yutilish spektri berilgan. Bu ikkita faol qatlamlarning yutilish spektrini solishtirish uchun PBB-TSA donor qatlamning ham yutilish spektri berilgan. PBB-TSA:IT-4F faol qatlamining DIO qo'shimchasiz optimal yutilish spektri 746 nm to'lqin uzunligida, DIO qo'shimchasi qo'shilgan PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning maksimal yutilish spektri esa 734 nm to'lqin uzunligida hosil bo'lishini ko'rishimiz mumkin[15].

Bu ikkala olingan spektr grafiklaridan shuni ko'rishimiz mumkinki DIO qo'shimchasini kiritganimizda PBB-TSA:IT-4F maksimum piklari qisqa to'lqin uzunligi tomon siljiganini ko'rishimiz mumkin. Bunda maksimum pik nuqtasi qisqa to'lqin uzunligiga ya'ni ko'k siljishga ega va siljish 12 nmga teng. Bundan tashqari 600 nm dan kichik to'lqin uzunliklarida DIO qo'shimcha qo'shilgan eritmada olingan faol qatlamlarning yutilish intensivligi qiymati DIO qo'shilmagan eritma orqali tayyorlangan faol qatlamlar yutilishi intensivligidan farq qilmoqda[23]. Misol uchun, 545 nm to'lqin uzunligiga mos keladigan pik nuqtasini olsak ikkita pik bir biridan 1,12 marta farq qilmoqda, 590 nm to'lqin uzunligiga mos keladigan opik nuqtasida esa 1,07 marta farq qilmoqda. Bu farqlarni faol qatlam strukturasi DIO eritmasi qo'shilgach, donor va akseptor bir biri bilan yaxshi aralashganini va natijada olingan faol qatlam morfologiyasi yaxshilangan holda molekulalar bir biriga yaqin zichroq joylashib tartiblanganligi bilan tushuntiriladi[16,17]. PBB-TSA donor faol qatlamning 545 va 590 nm to'lqin uzunligiga mos keluvchi yutilish pik nuqtasi mos ravishda 1,61 va 1,42 marta farq qilmoqda. Buning sababi donor fullerensiz akseptor bilan eritmada aralashtirilib faol qatlam hosil qilingach, donor va akseptor bir-biri bilan yaxshi aralashma hosil qilganligi va faol qatlam hosil qilganda struktura fazalari qayta taqsimlanib optimal faol qatlam hosil qilgan deya olamiz[7,5].

5-rasmda PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning va PBB-TSD:IT-4F eritmasiga DIO qo'shimchasi qo'shilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning yutilish spektri berilgan. Bu ikkita faol qatlamlarning yutilish spektrini solishtirish uchun PBB-TSD donor qatlamning ham yutilish spektri berilgan. DIO qo'shimchasi qo'shilmagan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning yutilish spektrining piki 753 nm to'lqin uzunligida,



5-rasm. Turli sharoitda olingan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlarning yutilish spektrlari

DIO qo'shimchasi qo'shilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning maksimal yutilish spektri esa 717 nm to'lqin uzunligida hosil bo'lishini ko'rishimiz mumkin. Bu yutilish spektr grafiklaridan DIO qo'shimchasini kiritganimizda PBB-TSD:IT-4F maksimum piklari qisqa to'lqin uzunligi tomon siljiganini, bunda maksimum pik nuqtasi qisqa to'lqin uzunligiga (ko'k siljish) 36 nmga siljigan. Bundan tashqari huddi PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning yutilish spektri kabi 600 nm dan kichik to'lqin uzunliklarida DIO qo'shimcha qo'shilgan eritmadan olingan faol qatlamlarning yutilish intensivligi qiymati DIO qo'shilmagan eritma orqali tayyorlangan faol qatlamlar yutilishi intensivligidan farq qilmoqda. Misol uchun 536 nm to'lqin uzunligiga mos keladigan pik nuqtasini olsak ikkita pik bir biridan 1,19 marta farq qilmoqda, 582 nm to'lqin uzunligiga mos keladigan yutilish pik nuqtasida esa 1,14 marta farq qilmoqda. Bu farqlarni huddi tepadagi PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning yutilish spektrlaridagi kabi, faol qatlam strukturasi DIO eritmasi qo'shilgach, donor va akseptor bir biri bilan yaxshi aralashganini va natijada olingan faol qatlam morfologiyasi yaxshilangan holda molekularlar bir biriga yaqin zichroq joylashib tartiblanganligi bilan tushuntiriladi[18]. PBB-TSD donor faol qatlamning 536 va 582 nm to'lqin uzunligiga mos keluvchi yutilish pik nuqtasi mos ravishda 1,29 va 1,5 marta farq qilmoqda. Buning sababi donor fullerensiz akseptor bilan eritmada aralashtirilib faol qatlam hosil qilingach, donor va akseptor bir-biri bilan yaxshi aralashganligi va qatlam hosil qilganda struktura fazalari qayta taqsimlanib optimal faol qatlam hosil qilgan deya olamiz[19].

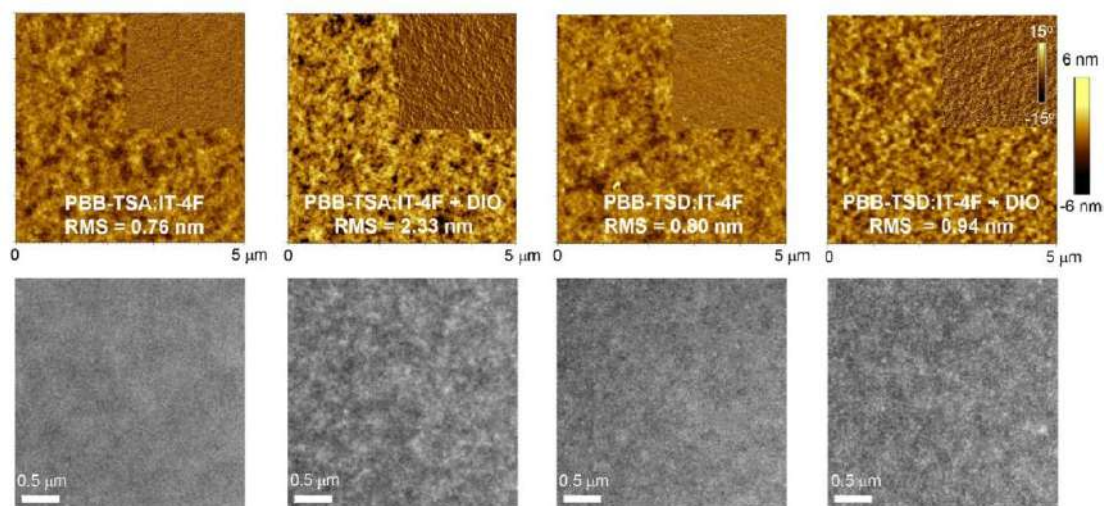
4-rasm va 5-rasmdagi yutilish spektrining bunday qisqa to'lqin uzunligi tomon siljishi spektroskopiyada - "Gipsoxrom" deb ataladi. Gipsoxrom deb - yutilish spektrining yuqori energiyaga yoki qisqaroq to'lqin uzunligiga siljishi aytiladi. Bu albatta konjugatsiyalangan polimer materiallarining $\pi-\pi^*$ o'tishlari hamda bog'lanish darajalari bilan bog'liq. PQElar sohasidagi maqolalarda DIO ni faol qatlamga qo'shimcha sifatida kiritish alohida kristalliklarning o'rtacha hajmiga ta'sir qilmaydi, balki ularning sonini oshiradi. Bundan tashqari, DIO o'ziga xos o'lchamini saqlab, amorf domenlarda donor va akseptorlarni o'zaro aralashishini yaxshilaydi. DIO qo'shimchasini kerakli miqdorda faol qatlam eritmasi tarkibiga qo'shish orqali uning sirt morfologiyasini tartiblanishiga va buning natijasida eksitonlar dissotsiatsiya oshishiga olib keladi. Demak DIO ni qo'shimcha sifatida kiritish PBB-TSD:IT-4F faol qatlamining yutilish spektrini yaxshilanishiga erishildi. PQE lari uchun mos donor-akseptor polimerlarni tanlash, ularni massa ulushi, faol qatlamining yaxshi yutilish koeffitsiyenti hamda fotovoltaiik parametrlari muhim hisoblanadi.

PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlarning optik xususiyatlaridan xulosa qiladigan bolsak, bu ikkita eritmaga DIO qo'shilmagan va qo'shilgan holatlarda ham PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning yorug'lik yutilish xossalari PQElar uchun samaraliroq ekanini ayta olamiz. Chunki, PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning yutilish spektri intensivligi har tomonlama PBB-TSA:IT-4F faol qatlam yutilish spektri intensivligidan optimalroq ekanini 4- va 5-rasmlardan ko'rish mumkin.

Keyingi tadqiqot bosqichida optik xossalarni tadqiq qilgan tadqiqot namunlarning morfologik va strukturaviy xususiyatlari tadqiq qilindi. 6-rasmda PBB-TSD:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlarning AFM va TEM tasvirlari berilgan bo'lib, bu faol qatlamlarning mikrotuzilishini va sirt morfologiyasini tahlil

qilish uchun ishlatilgan. AFM tasvirlari faol qatlamlarning sirt tozaligi va sirtining qattiqlik darajasini (RMS - Root Mean Square Roughness (notekislikning o'rtacha qiymati)) ko'rsatadi.

Optimallashtirilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning o'rtacha kvadratik notekislik qiymati 0,80 nm, PBB-TSA:IT-4F ning optimallashtirilgan faol qatlamniki esa 0,76 nm bo'lib, bu polimerlarning kristallilik darajasi oshishi bilan yuzaga keladi. DIO qo'shilishi bilan nanofibril tarmoqlari ikkala aralash faol qatlamlar uchun ham kuzatilishi mumkin. AFM tasvirlarga qaraydigan bo'lsak, PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning RSM qiymati 0.76 nm ga teng bo'lib bu nisbatan silliq sirt, PBB-TSA:IT-4F+DIO tarkibiga ega faol qatlamning RMS qiymati esa 2.33 nmga teng bo'lib, bu esa DIO qo'shimchasi qo'shmasdan tayyorlangan PBB-TSA:IT-4F faol qatlam yuzasiga nisbatan notekis sirt hisoblanadi.

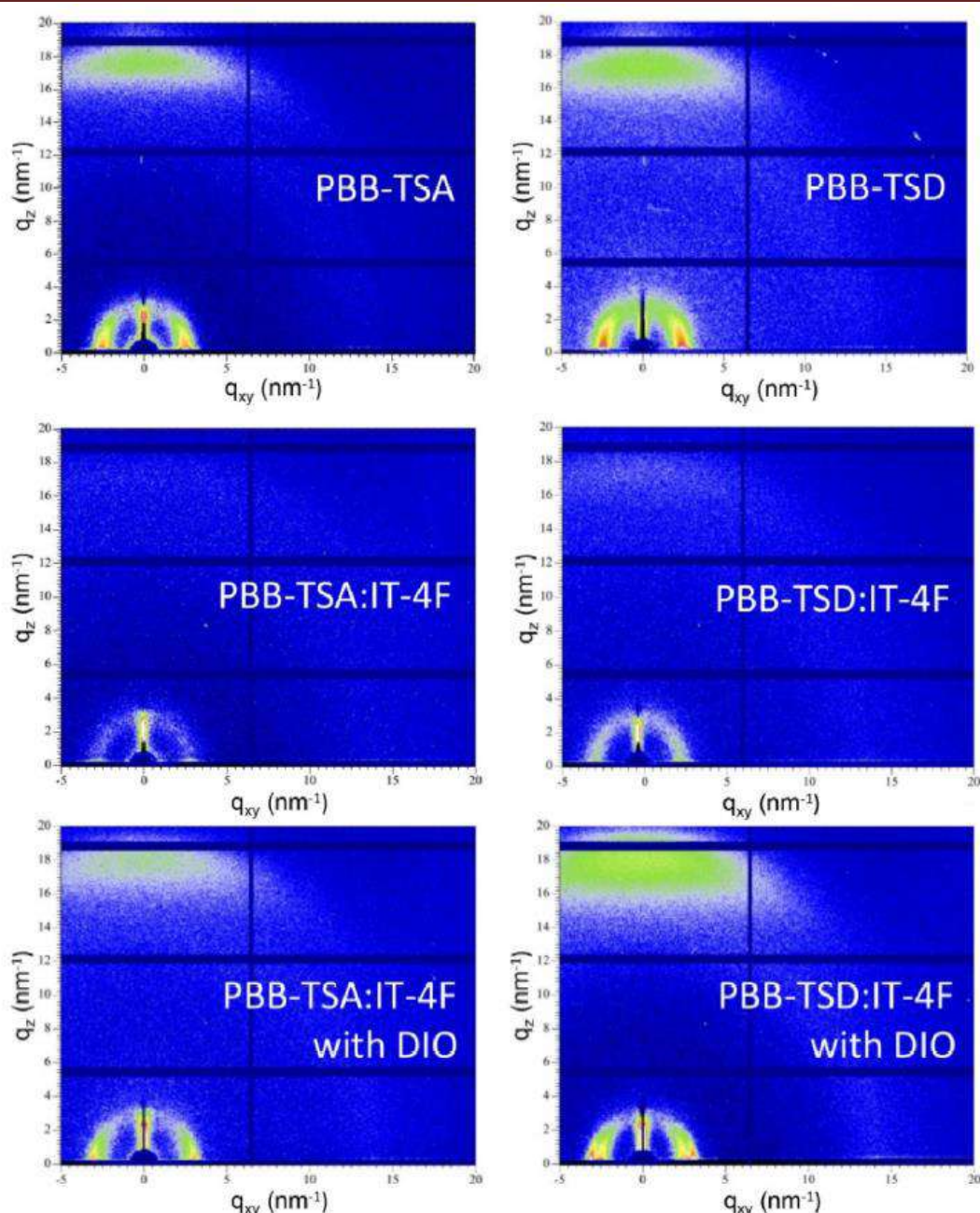


6-rasm. PBB-TSD, PBB-TSD va IT-4F polimerlar asosida tayyorlangan faol qatlamlarning AFM (tepadagi tasvirlar) va TEM (pastki tasvirlar) tasvirlari

PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning RSM qiymati esa 0.80 nmga teng bo'lib bu silliq sirt hisoblansa, PBB-TSD:IT-4F+DIO faol qatlamning RMS qiymati esa 0.94 nm teng bo'lib, bu esa PBB-TSD:IT-4F faol qatlamga nisbatan bir oz notekisroq sirt deb ta'riflasak bo'ladi. Bu AFM tasvirlaridan xulosa qiladigan bo'lsak, DIO qo'shimchasi qo'shilishi PBB-TSA:IT-4F materialining sirt notekisligini sezilarli oshirgan, lekin PBB-TSD:IT-4F uchun bu ta'sir kamroq ekanligini ayta olamiz.

Bundan tashqari, fazali tasvirlar yaxshi taqsimlangan nanofibrillar to'qimasini ko'rsatadi va kichikroq va bir xil domen hajmini beradi. Bu shuni ko'rsatadiki, sirt notekisligi pastroq bo'lgan PBB-TSD silliq morfologiyaga va bir xil fazalarni ajratishga ega shuning uchun sirt notekisligi ancha yuqori bo'lgan PBB-TSA bilan solishtirganda fullerensiz akseptorlar bilan katta muvofiqlikka ega. Optimallashtirilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning nisbatan yuzasi silliqroq morfologiyasi eksitonlarning harakatini, oson ajralishini va katodlarga yetib borishini yaxshilashi tufayli PQElarda yaxshilangan J_{SC} va FF qiymatlariga erishishga olib keladi. Ammo, faol qatlamlardagi silliq sirt ya'ni kichik RMS qiymatlari PQElarda elektron va kovaklarning uzluksiz transportini ta'minlaydi, bu esa yuqori samaradorlikka olib keladi. DIO qo'shilishi strukturada RSM qiymatini ya'ni notekislikni oshirgan. Bu ba'zi hollarda faol qatlamlarda fazalararo ko'chishni yaxshilaydi, lekin RMS qiymati optimal qiymatdan oshib ketsa bu PQElarning samaradorligini pasaytirishga olib keladi[20].

Bundan tashqari, DIO qo'shimchasi bilan nanoo'lchovli tarmoqlarning shakllanishi, shuningdek, ikkita polimer aralashmasining asosiy qismidagi faza holatlari transmissiya elektron mikroskopiyasi (TEM) tasvirlari bilan ham tasdiqlangan.



7-rasm. PBB-TSD, PBB-TSD va IT-4F polimerlar asosida tayyorlangan faol qatlamlarning GIWAXS tasvirlari

TEM tasvirlari polimer faol qatlamlarning ichki tuzilishini va nanozarrachalar yoki morfologiya birikmalarini ko'rsatadi. PBB-TSA:IT-4F+DIO va PBB-TSD:IT-4F + DIO holatlarida zarracha o'lchami va tuzilma yaxshiroq bog'langanligini TEM tasvirlaridan ko'rish mumkin. DIO qo'shilgan eritmalar orqali olingan faol qatlamlarda ichki morfologiya yanada aniqroq va bir xil shakllangan. Bu AFM va TEM tasvirlaridan umumiy xulosa qiladigan bo'lsak, DIO qo'shimchasining qo'shilishi eritma jarayonida ishlatiladigan qo'shimcha sifatida faol qatlam agregatsiyasini va kristallanishini yaxshiroq tartibga soladi, lekin PBB-TSA:IT-4F sirt notekisligini oshiradi ekan. PBB-TSD donor asosidagi faol qatlamlarning sirt notekisligi (RMS) va strukturasi yaxshiroq ekanligini bu faol qatlamlarning yutilish spektrlari natijalariga ham to'liq mos keladi va optik tadqiqot natijalari bilan xulosalarni ham to'la tasdiqlaydi[5-9].

7-rasmda PBB-TSD, PBB-TSD va IT-4F polimerlar asosida tayyorlangan faol qatlamlarning GIWAXS tasvirlari berilgan bo'lib, bu tasvirlar orqali faol qatlamlarning molekulyar tartibini va kristallik darajasini tahlil qilish mumkin. PBB-TSA va PBB-TSD donor polimerlar qatlamlarning tuzilishini tahlil qiladigan bo'lsak, tasvirlarda markaziy tarqalish nuqtasi va yon chiziqlar ko'rinadi. Demak, PBB-TSA va PBB-TSD donor qatlam strukturalarida ma'lum tartiblanish mavjud, lekin kristallanish darajasi pastroq

ekanligini ko'rishimiz mumkin. PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlarning GIWAX tasvirlarini tahlil qiladigan bo'lsak, donor polimerlarni IT-4F fullerensiz akseptor bilan aralashma sifatida faol qatlam hosil qilishi bilan difraktsiya intensivligini anglatuvchi chiziqlar yanada aniqroq bo'lib, molekulyar tartiblanish kuchayganini anglatadi. Bu donor va akseptorlar bilan kombinatsiyalar asosida olingan faol qatlamlarda fazalararo interfeyslarni yaxshilanib, elektron tashilishini yaxshilash uchun xizmat qiladi[12, 22,]. DIO qo'shimchasi qo'shish oqali PBB-TSA:IT-4F+DIO va PBB-TSD:IT-4F+DIO faol qatlamlardagi yorug'lik sochilish chiziqlarining intensivligi oshgani ko'rinadi. Bu DIO qo'shimchasi qo'shilishi natijasida molekulyar tartiblanish yaxshilanib, fazalarni yanada moslashtirganini anglatadi. GIWAX tasvirlardan PBB-TSD:IT-4F+DIO faol qatlamda eng aniq kristallanish va yaxshi fazalararo interfeyslarni ko'rsatmoqda, bu esa eksitonlarning harakatini va elektron-kovakning ajralishini yaxshilaydi, natijada PQElarning yuqori samaradorligiga olib keladi. 7-rasmdagi GIWAXS tasvirlarining tahliliga ko'ra, PBB-TSD:IT-4F+DIO faol qatlami PQElar uchun eng yaxshi nomzod hisoblanadi, GIWAX tasviridagi natijalar ham oldingi optik va morfologik natijalarimiz orqali olingan xulosalarimizni to'la tasdiqlamoqda.

PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F PQElarning samaradorligini oshirish maqsadida faol qatlamlar tarkibiga 1,8-diodoktan (DIO), xloronaftalin (CN), va difenil efir (DPE) qo'shimcha sifatida turli kichik konsentratsiyalarda kiritib ularning fotovoltaiik parametrlarini tahlil qildik. Bunda olingan natijalar 1 va 2-jadvallarda keltirilgan.

1-jadval. PBB-TSA:IT-4F faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari

PBB-TSA:IT-4F (massa bo'yicha)	Qo'shimcha modda	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	EO'S (%)
1:1	---	0.85	18.4	57.5	9.0
1:1.2	---	0.86	18.5	59.4	9.4
1:1.4	---	0.86	17.9	57.7	8.9
1:1.2	---	0.84	16.4	63.6	8.8
1:1.2	DIO	0.82	19.1	68.4	10.7
	CN	0.86	18.8	55.5	9.0
	DPE	0.83	19.8	45.4	7.5

1-jadvalda PBB-TSA:IT-4F PQElarning turli massa nisbatlarida va turli qo'shimcha moddalardan foydalangan holda tayyorlangan faol qatlamlarning fotovoltaiik parametrlari ko'rsatilgan. Birinchi holda, ya'ni PBB-TSA:IT-4F faol qatlamlar 1:1 nisbatda olinganda va hech qanday qo'shimcha modda ishlatilmaganda, V_{oc} 0,85 V, J_{sc} 18,4 mA/cm², FF 57,5 %, EO'S esa 9,0 % ni tashkil etdi. PBB-TSA:IT-4F faol qatlamlarning donor-akseptor nisbati 1:1,2 ga oshirilganda va yana qo'shimcha qo'shilmagan holda tayyorlanganda esa J_{sc} 18,5 mA/cm² va EO'S ning 9,4% ga oshganligini ko'rishimiz mumkin, FF ham 59,4 % ga ko'tarilgan. Undan so'ng PBB-TSA:IT-4F ni 1:1,4 massa nisbatida olib yana qo'shimcha modda qo'shmagan holda fotovoltaiik parametrlari o'lgandi. Bunda V_{oc} 0,86 V bo'lib qolgan, lekin J_{sc} (17,9 mA/cm²) biroz pasaygan va EO'S (8,9 %) ham shunga mos ravishda biroz kamaygan. To'ldirish faktori FF 57,7 % ga tushgan. Bu nisbatan pasaygan natijalarni modda nisbatlari optimaldan oshib ketganligi bilan izohlash mumkin[15,33,17]. Eng yaxshi natijalar 1:1,2 nisbatda olingan faol qatlamlarda kuzatildi. Shuning uchun biz donor-akseptor nisbatini 1:1,2 da qoldirib unga DIO, CN, DPE qo'shimchalarini qo'shgan holda tayyorlab faol qatlamlarning fotovoltaiik parametrlarini o'lgadik. DIO qo'shimchasi qo'llanganda, faol qatlamning umumiy samaradorligi sezilarli darajada oshdi. V_{oc} (0,82 V) biroz pasaygan bo'lsa ham, J_{sc} (19,1 mA/cm²), FF (68,4%) va EO'S (10,7%) kabi parametrlar ancha yuqori bo'lgan. PBB-TSA:IT-4F faol qatlamiga CN qo'shimchasi qo'llanganda, V_{oc} 0,86 V, J_{sc} 18,8 mA/cm², FF 55,5 % va EO'S 9,0 % ni ko'rsatgan. Bu holatda DIO bilan solishtiradigan bo'lsak samaradorlik pastroq chiqqan va CN qo'shilishi faol qatlamning umumiy samaradorligini sezilarli darajada oshira olmagan. PBB-TSA:IT-4F faol qatlamiga DPE qo'shilganda esa J_{sc} yuqori chiqqan bo'lsa-da (19,8 mA/cm²), FF 45,4 % ga va EO'S esa 7,5 % ga tushib ketdi. Yuqoridagi ko'rsatgichlarga asoslanib, PBB-TSA:IT-4F PQElar massa nisbati 1:1,2 bo'lganda va DIO qo'shimchasi qo'shilgan holda eng yuqori samaradorlikka erishilganligi ko'rinib turibdi. DIO qo'shimchasi faol qatlamlarning FF va EO'S qiymatlarini sezilarli darajada oshirgan, bu esa uning boshqa qo'shimchalarga qaraganda PBB-TSA:IT-4F PQElarning fotovoltaiik parametrlari uchun eng samarali modda ekanligini ko'rsatdi. Qolgan qo'shimchalar (CN, DPE) keltirilgan qiymatlarga ko'ra samaradorlikni oshira olmagan va hatto ayrim parametrlarning qiymatlari (masalan FF va EO'S) nisbatan pastroq natija ko'rsatdi. DIO qo'shimchasini kerakli miqdorda faol qatlam eritmasi tarkibiga qo'shish orqali uning sirt

morfologiyasini tartiblanishiga va buning natijasida eksitonlar dissotsiatsiyasi oshishiga erishish mumkin. Bu esa o'z navbatida eksitonlar rekombinatsiyasi kamayishi hamda EO'Sning oshishiga olib keladi[19,20].

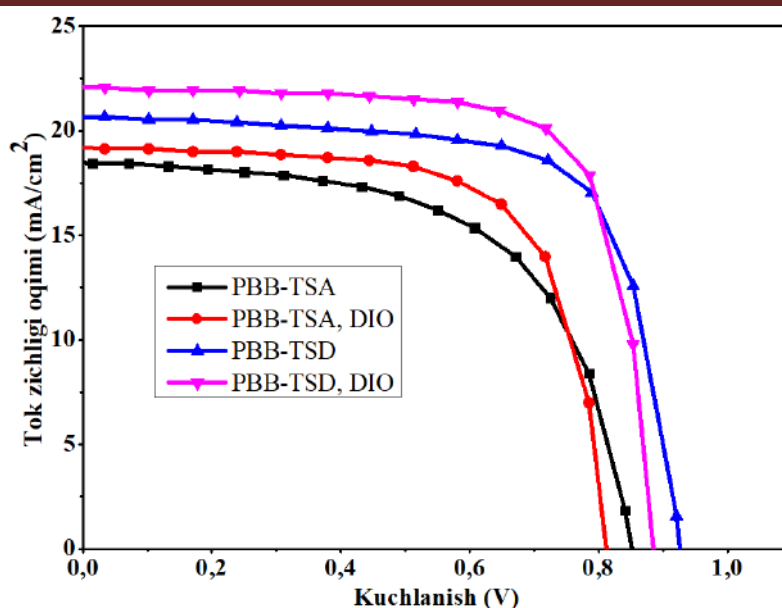
2-jadvalda PBB-TSD:IT-4F PQElarning turli massa nisbatlari va qo'shimcha moddalar kiritilgan holdagi fotovoltaiik parametrlari keltirilgan. Birinchi holda, ya'ni PBB-TSD:IT-4F PQE lar asosidagi faol qatlamlar 1:1 nisbatda va hech qanday qo'shimcha modda qo'shilmagan holda tayyorlanganda V_{OC} 0,91 V, J_{SC} 20,0 mA/cm², FF 69,2 % va EO'S 12,6 % natija ko'rsatdi. So'ngra donor-akseptor nisbatini 1:1,2 ga oshirib uning fotovoltaiik parametrlarini o'lgananimizda J_{SC} 20,6 mA/cm², FF 70,7% va EO'S 13,6 % ga oshdi. Keyin natijalarni taqqoslash uchun massa nisbatini yana oshirdik va qo'shimcha qo'shmagan holda faol qatlamlarni tayyorlab ularning fotovoltaiik parametrlarini yana qaytadan o'lgadik. Bu holda V_{OC} 0,92 V ga oshgan, lekin J_{SC} 19,4 mA/cm² ga pasaygan. EO'S ham biroz kamayib, 12,2 % ni tashkil etgan, to'ldirish faktori (FF) ham 68,4% ga tushgan. Fotovoltaiik parametrlar natijalarini bunday pasayib ketganligi yuqorida keltirilganidek, modda nisbatlari optimaldan oshib ketganligi bilan izohlanadi.

2-jadval. PBB-TSD:IT-4F faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari

PBB-TSD:IT-4F (massa bo'yicha)	Qo'shimcha modda	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/cm ²)	FF (%)	EO'S (%)
1:1		0.91	20.0	69.2	12.6
1:1.2		0.93	20.6	70.7	13.6
1:1.4		0.92	19.4	68.4	12.2
1:1.2		0.91	20.0	69.2	12.6
1:1.2	DIO	0.89	21.9	74.5	14.6
	CN	0.92	20.2	63.7	11.8
	DPE	0.90	21.2	65.0	12.4

Bundan xulosa qilgan holda biz tadqiqotlarni donor-akseptorlarning 1:1,2 nisbati bilan davom ettirdik va PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlariga DIO qo'shimchasini qo'shish orqali faol qatlamlarni tayyorladik. Natijada V_{OC} 0,89 V va J_{SC} 21,9 mA/cm² ga ko'tarildi, FF va EO'S ham mos ravishda 74,5 % va 14,6 % ga oshdi. Keyingi bosqichda PBB-TSD:IT-4F PQElar asosida tayyorlangan faol qatlamga CN qo'shimchasini qo'shib fotovoltaiik parametrlarini o'lganganda, V_{OC} 0,92 V, J_{SC} 20,2 mA/cm², FF 63,7 % va EO'S 11,8 % natijani ko'rsatdi. Bu holatda CN moddasining samaradorligi uncha yuqori bo'lmaganligini ko'rish mumkin. DPE qo'shimchasi kiritilgan PBB-TSD:IT-4F PQElarning fotovoltaiik parametrlari CN ga nisbatan yaxshiroq natija ko'rsatgan bo'lsada, DIO qo'shimchasi qo'shilgan faol qatlamlarning fotovoltaiik natijalariga nisbatan past chiqqanligini ko'rish mumkin. Massa nisbati 1:1,2 bo'lgan faol qatlamlar, hech qanday qo'shimcha modda qo'shilmagan holatda ham yaxshi natijalar ko'rsatgan, bu shuni anglatadiki PBB-TSD:IT-4F PQE lar uchun 1:1,2 nisbat optimal bo'lgan lekin DIO moddasining qo'shilishi bu natijalarni yanada yaxshilagan. Umuman olganda, ushbu jadvaldagi natijalarni tahlili shuni ko'rsatadiki, DIO qo'shimchasi bilan massa nisbati 1:1,2 bo'lganda PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlari yuqori samaradorlikka erishgan.

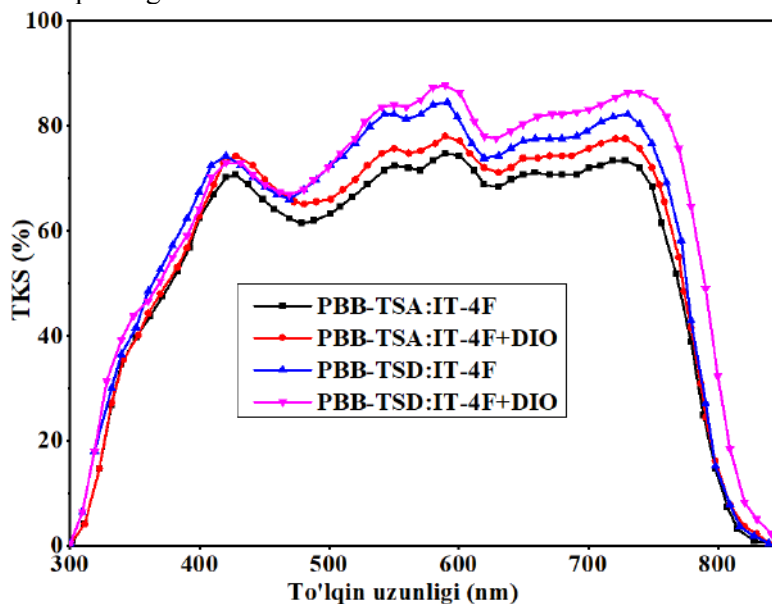
PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlarning fotovoltaiik parametrlaridan xulosa qiladigan bolsak, bu ikkita eritmaga DIO qo'shilmagan va qo'shilgan holatlarda ham PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning yorug'lik yutilish xossalari PQElar uchun samaraliroq ekanini ayta olamiz. Chunki, PBB-TSD:IT-4F faol qatlamning fotovoltaiik parametrlari har tomonlama PBB-TSA:IT-4F faol qatlamning fotovoltaiik parametrlaridan optimalroq ekanini 1 va 2-jadvallardan ko'rish mumkin.



8-rasm. PBB-TSA va PBB-TSD donorlar bilan IT-4F akseptor asosidagi PQElarning volt-ampere xarakteristika grafigi

8-rasmda PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F PQElarning DIO qo'shimchasi qo'shilgan va qo'shilmagan holdagi volt-ampere xarakteristika grafiglari berilgan. Grafiglardan ko'rish mumkinki, FF yuzasi eng katta holat PBB-TSD:IT-4F eritmasiga DIO qo'shimchasi kiritilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamlarga tegishli, bunda FF qiymati 74,5 % ga teng.

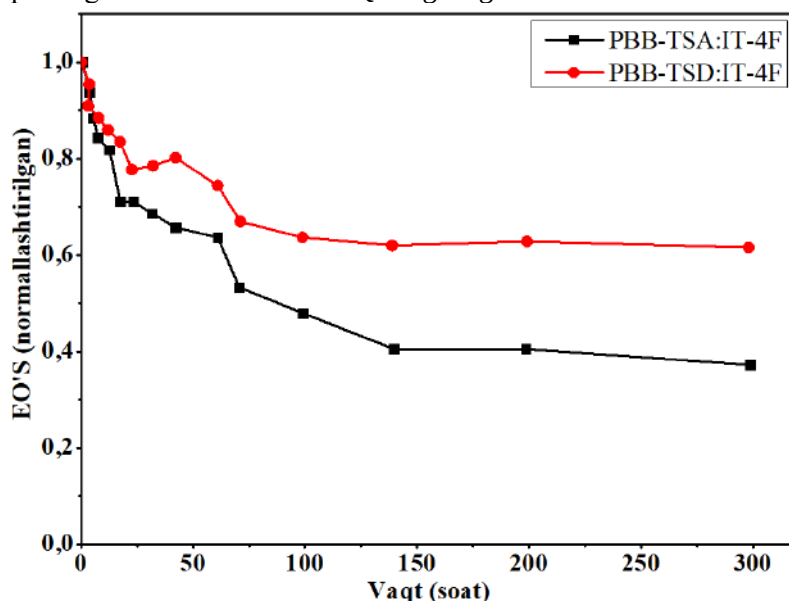
Bizga ma'lumki, PQElarni sanoatda ishlab chiqarish uchun uning yuqori samaradorlik va tashqi muhitda barqarorligi kabi xususiyatlari muhim hisoblanadi. Shundan kelib chiqib tadqiqot davomida turli sharoitda tayyorlangan PBB-TSA va PBB-TSD donorlar bilan IT-4F akseptor asosidagi PQElarning tashqi kvant samaradorligi va barqarorligi ham o'lgandi.



9-rasm. Bir xil sharoitda tayyorlangan PBB-TSA va PBB-TSD donorlar bilan IT-4F akseptor asosidagi PQElarning TKS spektri

9-rasmda PBB-TSA:IT-4F va PBB-TSD:IT-4F PQElarning tashqi kvant samaradorligi (TKS) spektrlarini faol qatlamlarning yutilish spektrlari va PQElardagi fototok qiymatlarini to'g'ri ekanligini isbotlash uchun ham o'lgandi. TKS spektrlariga e'tibor beradigan bo'lsak, barcha faol qatlamlarning yutilish spektrlari kabi DIO qo'shimchasi qo'shilgan faol qatlamlar asosidagi PQElar spektri qizil to'lqin tomon siljigan. Bu esa faol qatlamlarning yutilish spektri natijalarini to'la tasdiqlaydi. Grafigdan ko'rishimiz mumkinki, PQElarning TKS spektri 300 dan 800 nm gacha bo'lgan keng to'lqin uzunligi diapazonini

qamrab olgan, bu natija esa yutilish spektri natijalariga ham to'liq mos keladi. TKS ning eng yuqori qiymati 87 % bo'lib bu DIO qo'shilgan PBB-TSD:IT-4F PQElarga tegishlidir.



10-rasm. PBB-TSA va PBB-TSD donorlar bilan IT-4F akseptor asosidagi PQElarning barqarorligi

10-rasmda PBB-TSA va PBB-TSD donorlar bilan IT-4F akseptor asosidagi PQElarning vaqt o'tishi bilan degradatsiya jarayoniga barqarorligi 300 soat davomida kuzatildi. Grafikdan ko'rish mumkinki, EO'S qiymatining boshlang'ich holatdagi qiymatini bir birlikka teng deb olib, EO'S qiymatining vaqt o'tishi bilan o'zgarishini ya'ni PQElarning degradatsiya jarayoni tadqiq qilindi. Masalan 50 soatdan so'ng PBB-TSA:IT-4F PQElarning samaradorligi keskin pasaydi va taxminan 0,6 birlik qiymatga tushdi. Bu pasayish degradatsiyaning tezkor sodir bo'layotganini bildiradi va 300 soatdan so'ng esa samaradorligining 0.3 qisminigina saqlab qoldi. PBB-TSD:IT-4F PQElar esa samaradorlikni nisbatan uzoq vaqt saqlab qoldi va 50 soat ichida 0,8 qiymatni ko'rsatdi. 300 soatdan keyin esa samaradorlikning 0.6 qismi saqlab qolganini ko'rishimiz mumkin. Bu natija PBB-TSD: IT-4F PQElar PBB-TSA:IT-4F PQElarga qaraganda degradatsiya jarayoniga yaxshiroq chidamli ekanligini bildiradi.

Xulosa. Optik yutilish spektrlari tahlili IT-4F ning PBB-TSD va PBB-TSA bilan aralashmalarda keng spektral diapazonda samarali yorug'lik yutilishini ta'minlashini ko'rsatdi. DIO qo'shimchasining kiritilishi IT-4F asosidagi faol qatlamlarda donor va akseptor fazalarining ajralishini kuchaytirib, molekulararo tartiblanganlikni yaxshilashi isbotlandi.

IT-4F asosida optimallashtirilgan PBB-TSD:IT-4F faol qatlamli polimer quyosh elementlari 0,89 V ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}), 21,9 mA/cm² qisqa tutashuv toki zichligi (J_{sc}) va 74,5% to'ldirish koeffitsiyenti (FF) bilan 14,6% samaradorligini erishildi.

Donor:IT-4F asosidagi faol qatlamlarning yutilish spektr natijalaridan fazalarning ajralishi va tartiblangan molekulyar tartiblanish DIO qo'shimchasidan foydalanganda boshqa qo'shimchalarga nisbatan faol qatlamlarning samaradorligi optimalroq bo'lishi xulosa qilindi. Bu xulosalarimizni PQElarning fotovoltaiik parametrlari ham tasdiqladi.

Faol qatlamlarning yutilish spektr natijalari va PQElarning fotovoltaiik natijalari haqqoniyligini ya'ni yutilish spektri yaxshi bo'lgan faol qatlam asosidagi PQElarning fotovoltaiik parametrlari optimal bo'lishi bir biri bilan uzviy bog'liq holda bo'layotganini PQElarning TKS spektrlari natijalari bilan isbotlandi.

Minnatdorchilik. Ushbu maqoladagi olingan natijalar O'zbekiston Respublikasi Innovatsion rivojlanish vazirligining Fundamental tadqiqotlar dasturi doirasidagi loyihada va O'zRFA U. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti bazaviy moliyalashtirish mablag'lari ko'magida bajarilgan.

ADABIYOTLAR:

1. W. J. Brittain and S. Minko, "A structural definition of polymer brushes," *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, vol. 45, no. 16, pp. 3505-3512, 2007.
2. M. P. Stevens, *Polymer chemistry*. Oxford university press New York, 1990.

3. A. H. Al-Safy, K. I. Abd Nasaif, B. A. Hussein, and M. N. Al-Baiati, "Effect of Mefenamic Acid Drug-Polymer Nanocomposite on Some Biochemical Parameters in Serum of Kidney and Testicular Tissue in Male Albino Rats," *Life Sciences*, vol. 338, p. 122409, 2024.
4. H. Inokuchi, "The discovery of organic semiconductors. Its light and shadow," *Organic electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 62-76, 2006.
5. F. F. Yıldırım, E. Gelgeç, Ş. Yumru, and M. Çörekcioglu, "One bath dyeing of PBT/Nylon blended seamless fabrics," *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, vol. 31, pp. 113-121, 2019.
6. P. Sperling and E. Heinz, "Desaturases fused to their electron donor," *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 103, no. 3, pp. 158-180, 2001.
7. A.-E. Becquerel, "Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques," *CR Acad. Sci*, vol. 9, no. 145, p. 1, 1839.
8. J. W. Smith, J. I. C. Hare, and H. B. Wallace, *A Selection of Leading Cases, on Various Branches of the Law: With Notes*. T & JW Johnson & Company, 1873.
9. A. Pochettino, "Sul comportamento foto-elettrico dell'antracene," *Acad. Lincei Rend*, vol. 15, p. 355, 1906.
10. D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power," *Journal of applied physics*, vol. 25, no. 5, pp. 676-677, 1954.
11. J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, and F. Ferrazza, "19.8% efficient "honeycomb" textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells," *Applied physics letters*, vol. 73, no. 14, pp. 1991-1993, 1998.
12. N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, and F. Wudl, "Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene," *Science*, vol. 258, no. 5087, pp. 1474-1476, 1992.
13. N. S. Sariciftci et al., "Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells," *Applied physics letters*, vol. 62, no. 6, pp. 585-587, 1993.
14. J. C. Bernede Boulerie, M. Del Valle De La Cortina, F. R. Diaz Alzamora, and V. Jousseume, "From the organic electroluminescent diodes to the new organic photovoltaic cells," 2001.
15. C. W. Tang and A. C. Albrecht, "Photovoltaic effects of metal-chlorophyll-a-metal sandwich cells," *The Journal of chemical physics*, vol. 62, no. 6, pp. 2139-2149, 1975.
16. D. Kearns and M. Calvin, "Photovoltaic effect and photoconductivity in laminated organic systems," *The Journal of chemical physics*, vol. 29, no. 4, pp. 950-951, 1958.
17. B. Weinberger, M. Akhtar, and S. Gau, "Polyacetylene photovoltaic devices," *Synthetic Metals*, vol. 4, no. 3, pp. 187-197, 1982.
18. F. R. Fan and L. R. Faulkner, "Photovoltaic effects of metalfree and zinc phthalocyanines. II. Properties of illuminated thin-film cells," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 69, no. 7, pp. 3341-3349, 1978.
19. G. Chamberlain, "Organic solar cells: A review," *Solar cells*, vol. 8, no. 1, pp. 47-83, 1983.
20. C. W. Tang, "Two-layer organic photovoltaic cell," *Applied physics letters*, vol. 48, no. 2, pp. 183-185, 1986.

ОБ ОДНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОЗНИКАЮЩЕЙ В ДВУХЖИДКОСТНОЙ СРЕДЕ

*Эркинова Динора Абдулхамид кизи,
Преподаватель Каршинского государственного
университета.*

Аннотация. Рассматривается задача Коши для одномерной однородной системы уравнений типа Хопфа возникающая в двух жидкостной среде. Считается, что диссипация энергии происходит только за счет коэффициента трения (аналога Дарси) и данные Коши заданы в виде конечного тригонометрического ряда Фурье. Получены рекуррентные системы обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитуд для N приближений. Построено частное решение полученной ОДУ при $N=3$.

Ключевые слова: двухфазная среда, парциальная плотность, задача Коши, вязкость, коэффициент Дарси, ряд Фурье, уравнение Хопфа.

IKKI SUYUQLIKLI MUHITDA YUZAGA KELADIGAN BIR NOCHIZIQLI MATEMATIK MODELNI O'RGANISH

Abstrakt. Ikki suyuq muhitda yuzaga keladigan Hopf tipidagi tenglamalarning bir o'lchovli bir xil tizimi uchun Koshi muammosini ko'rib chiqamiz. Energiya tarqalishi faqat ishqalanish koeffitsiyenti tufayli sodir bo'ladi, deb taxmin qilinadi (Darsiga o'xshash) va Koshi ma'lumotlari chekli trigonometrik Furiye qatori sifatida berilgan. "Yaqinlashuvlar uchun amplitudalar bo'yicha oddiy differensial tenglamalarning rekurrent tizimlari olindi. Olingan ODT uchun $N=3$ holatda xususiy yechim qurildi."

Kalit so'zlar: ikki fazali muhit, qisman zichlik, Koshi muammosi, yopishqoqlik, darsi koeffitsiyenti, Furiye qatori, Hopf tenglamasi.

ON A NONLINEAR MATHEMATICAL MODEL ARISING IN A TWO-FLUID MEDIUM

Abstract. We consider the Cauchy problem for a one-dimensional homogeneous system of Hopf-type equations arising in a two-fluid medium. Energy dissipation is assumed to occur solely due to the friction coefficient (analogous to Darcy), and the Cauchy data are given as a finite trigonometric Fourier series. Recurrent systems of ordinary differential equations for the amplitudes of the approximations are obtained. A particular solution to the resulting ODE is constructed for $N=3$.

Keywords: two-phase medium, partial density, Cauchy problem, viscosity, Darcy coefficient, Fourier series, Hopf equation.

Введение. Гидродинамическая модель многофазной жидкости хорошо известна и подробно описана в учебниках и монографиях по механике сплошных сред [1-7]. Уравнение Хопфа из простейших гиперболических моделей, в которых задача Коши для уравнения Хопфа эквивалентна теореме о неявной функции. Это уравнение учитывает только адъективные процессы в модели. Если учитывать эффекты межфазного трения, то, как показано в двух жидкостной среде [8-23] возникает система гиперболического типа Хопфа. У системы уравнений двухскоростной гидродинамики и системы уравнений типа Хопфа много общего. Данная система учитывает следующие эффекты: наличие квадратичной нелинейности по скоростям подсистем, связанной с адъективными процессами и отвечающей зависимости скорости распространения звука от амплитуды звуковых волн, и наличие линейного по относительно импульсу диффузионного слагаемого в правых частях, связанного с процессами межфазного трения и отвечающего за затухание звуковых волн. Что касается свойств решений, то они совершенно разные. У системы уравнений типа Хопфа при исчезающем коэффициенте, аналоге коэффициента Дарси, формируются как сильные (ударные волны), так и слабые разрывы, в то время как решение системы двухскоростной гидродинамики такими особенностями не обладает. Однако область применимости этой системы отнюдь не ограничивается приведенными примерами, такие системы возникают во многих задачах, чем и определяется ее значение [24]. Поэтому особой ценностью обладают нелинейные модели, пусть и сильно упрощенные

в сравнении с исходной системой двухскоростной гидродинамики, однако сохраняющие ее важные черты.

Постановка задачи. Рассмотрим процесс распространения нелинейных волн в двух жидкостной среде, описываемый одномерной однородной системой уравнений [8, 9, 14, 15, 16, 22-24]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -b(u - \tilde{u}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = \varepsilon b(u - \tilde{u}), \quad (2)$$

где u и $\tilde{u}$ — скорости подсистем с соответствующими парциальными плотностями ρ и $\tilde{\rho}$, b — положительная постоянная отвечающая за трение в системе (аналог коэффициента Дарси), $\varepsilon = \frac{\rho}{\tilde{\rho}}$ — безразмерная положительная постоянная.

Рассмотрим задачу Коши для системы уравнений типа Хопфа с периодическими начальными данными в виде тригонометрического многочлена [25]:

$$u|_{t=0} = \sum_{j=-N}^N \alpha_j e^{ijx}, \quad (3)$$

$$\tilde{u}|_{t=0} = \sum_{j=-N}^N \tilde{\alpha}_j e^{ijx}. \quad (4)$$

Отметим, что при любой постоянной C решение $u(t, x)$ и $\tilde{u}(t, x)$ задачи Коши для системы (1), (2) можно заменить другим решением $U(t, x)$ и $\tilde{U}(t, x)$ со сдвинутыми на C начальными данными:

$$U(t, x) = C + u(t, x + Ct), \quad \tilde{U}(t, x) = C + \tilde{u}(t, x + Ct).$$

Эти функции удовлетворяют системе (1), (2). Данная однопараметрическая группа симметрий позволяет выбрать $\alpha_0 = 0$ и $\tilde{\alpha}_0 = 0$ в начальных данных задачи (3), (4) и перейти от системы уравнений типа Хопфа к проинтегрированной системе уравнений

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial x} = -b(v - \tilde{v}), \quad u = \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tilde{v}^2}{\partial x} = \varepsilon b(v - \tilde{v}), \quad \tilde{u} = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}. \quad (6)$$

Приближенное решение последней системы строится методом Галеркина [25]:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial v^2}{\partial x} \right\} = -b(v - \tilde{v}),$$

$$v(\tau, x) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} a_n(\tau) e^{inx} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} b_n(\tau) e^{-inx}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tau} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial \tilde{v}^2}{\partial x} \right\} = \varepsilon b(v - \tilde{v}),$$

$$\tilde{v}(\tau, x) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} \tilde{a}_n(\tau) e^{inx} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{n} \tilde{b}_n(\tau) e^{-inx}. \quad (8)$$

Фигурные скобки обозначают здесь отбрасывание высших гармоник с номерами, большими N [25]. Приравнивание коэффициентов при e^{imx} , $|m| \leq N$, в уравнениях для $v(\tau, x)$ и $\tilde{v}(\tau, x)$ приводит к замкнутой системе дифференциальных уравнений относительно $4N$ неизвестных функций $a_n(\tau)$, $\tilde{a}_n(\tau)$ и $b_n(\tau)$, $\tilde{b}_n(\tau)$:

$$\begin{aligned} a'_n(\tau) &= f_n(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - b(a_n - \tilde{a}_n), \\ b'_n(\tau) &= g_n(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - b(b_n - \tilde{b}_n), \quad n = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tilde{a}'_n(\tau) &= \tilde{f}_n(\tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{b}}) + \varepsilon b(a_n - \tilde{a}_n), \\ \tilde{b}'_n(\tau) &= \tilde{g}_n(\tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{b}}) + \varepsilon b(b_n - \tilde{b}_n), \quad n = 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (10)$$

где штрих – это дифференцирование по времени, которое мы обозначаем через τ .

Начальные данные для динамической системы (9), (10) в силу соотношения $u = \frac{\partial v}{\partial x}$ и $\tilde{u} = \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}$

задаются в виде

$$\begin{aligned} a_n(0) &= -i\alpha_n, \quad b_n(0) = i\alpha_{-n}, \quad n = 1, \dots, N, \\ \tilde{a}_n(0) &= -i\tilde{\alpha}_n, \quad \tilde{b}_n(0) = i\tilde{\alpha}_{-n}, \quad n = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

Для вещественных решений должно выполняться условия $\bar{a}_n = b_n$ и $\bar{\tilde{a}}_n = \tilde{b}_n$.

В динамической системе (9), (10) функции $f_n(\mathbf{a}, \mathbf{b})$, $\tilde{f}_n(\tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{b}})$ и $g_n(\mathbf{a}, \mathbf{b})$, $\tilde{g}_n(\tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{b}})$ являются однородными квадратичными многочленами своих аргументов. В качестве иллюстрации приведем вид функции $\tilde{f}_n(\tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{b}})$ в зависимости от четности числа N :

$$\tilde{f}_N = \begin{cases} -N(\tilde{a}_1\tilde{a}_{N-1} + \tilde{a}_2\tilde{a}_{N-2} + \dots + \tilde{a}_m\tilde{a}_{m+1}), & N = 2m + 1, \\ -N(\tilde{a}_1\tilde{a}_{N-1} + \tilde{a}_2\tilde{a}_{N-2} + \dots + \tilde{a}_{m-1}\tilde{a}_{m+1}) - m\tilde{a}_m^2, & N = 2m. \end{cases}$$

Рассмотрим теперь вопрос об интегрировании системы уравнений типа Хопфа. В частности, при $N = 3$ динамическая система (9), (10) имеет следующий вид:

$$a'_1 = b_1a_2 + b_2a_3 - b(a_1 - \tilde{a}_1), \quad (11)$$

$$b'_1 = a_1b_2 + a_2b_3 - b(b_1 - \tilde{b}_1), \quad (12)$$

$$a'_2 = 2b_1a_3 - a_1^2 - b(a_2 - \tilde{a}_2), \quad (13)$$

$$b'_2 = 2a_1b_3 - b_1^2 - b(b_2 - \tilde{b}_2), \quad (14)$$

$$a'_3 = -3a_1a_2 - b(a_3 - \tilde{a}_3), \quad (15)$$

$$b'_3 = -3b_1b_2 - b(b_3 - \tilde{b}_3), \quad (16)$$

$$\tilde{a}'_1 = \tilde{b}_1\tilde{a}_2 + \tilde{b}_2\tilde{a}_3 + \varepsilon b(a_1 - \tilde{a}_1), \quad (17)$$

$$\tilde{b}'_1 = \tilde{a}_1\tilde{b}_2 + \tilde{a}_2\tilde{b}_3 + \varepsilon b(b_1 - \tilde{b}_1), \quad (18)$$

$$\tilde{a}'_2 = 2\tilde{b}_1\tilde{a}_3 - \tilde{a}_1^2 + \varepsilon b(a_2 - \tilde{a}_2), \quad (19)$$

$$\tilde{b}'_2 = 2\tilde{a}_1\tilde{b}_3 - \tilde{b}_1^2 + \varepsilon b(b_2 - \tilde{b}_2), \quad (20)$$

$$\tilde{a}'_3 = -3\tilde{a}_1\tilde{a}_2 + \varepsilon b(a_3 - \tilde{a}_3), \quad (21)$$

$$\tilde{b}'_3 = -3\tilde{b}_1\tilde{b}_2 + \varepsilon b(b_3 - \tilde{b}_3). \quad (22)$$

Легко заметить, что нулевой вектор $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{b}}) = \mathbf{0}$ является тривиальным решением. В данной работе построено частное решение динамической системы (11)-(22):

$$\begin{aligned} a_1 = \tilde{a}_1 = b_1 = \tilde{b}_1 = 0, & \quad a_2 = \tilde{a}_2 = b_2 = \tilde{b}_2 = 0, \\ a_3 = \frac{c_2 + c_1 e^{-(1+\varepsilon)bt}}{1 + \varepsilon}, & \quad \tilde{a}_3 = \frac{c_2 - \varepsilon c_1 e^{-(1+\varepsilon)bt}}{1 + \varepsilon}, \\ b_3 = \frac{c_4 + c_3 e^{-(1+\varepsilon)bt}}{1 + \varepsilon}, & \quad \tilde{b}_3 = \frac{c_4 - \varepsilon c_3 e^{-(1+\varepsilon)bt}}{1 + \varepsilon}, \end{aligned}$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 — произвольные постоянные.

Заключение. Таким образом рассмотрена задача Коши для одномерной однородной системы уравнений типа Хопфа, моделирующей процессы в двухжидкостной среде с учётом межфазного трения (аналог коэффициента Дарси). Начальные данные заданы в виде конечного тригонометрического ряда Фурье, что позволило применить метод Галеркина и получить замкнутую рекуррентную систему обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитуд приближённого решения. Для случая $N=3$ построено частное решение полученной динамической системы, выраженное через произвольные постоянные. Результаты могут быть использованы при дальнейшем анализе нелинейных волновых процессов в двухфазных средах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. М.: Мир, 1975. - 592 с. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть 1. М: Наука. 1987.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть 2. М: Наука. 1987.
3. Доровский В.Н., Перепечко Ю.В., Роменский Е.И. Волновые процессы в насыщенных пористых упруго деформируемых средах // ФГВ. 1993. № 1. с.100-111.
4. Blokhin A.M., Dorovsky V.N. Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum. New York: Nova Science Publishers Inc., 1995. 192p.
5. Имомназаров Х. Х. Численное моделирование некоторых задач теории фильтрации для пористых сред // Сиб.ЖИМ. 2001. т.IV, №2(8). С.154-165.
6. Имомназаров Х.Х., Холмуродов А.Э. Моделирование и исследование прямых и обратных динамических задач пороупругости. Изд. Университет, Ташкент, 2017, 120с.
7. Имомназаров Х.Х., Янгибоев З.Ш. Прямые и обратные задачи для систем уравнений гиперболического типа, Основные понятия, методы решения, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2022, 169с.
8. Vasiliev G.S., Imomnazarov Kh.Kh., Mamasoliyev B.J On one system of the Burgers equations arising in the two-velocity hydrodynamics // Journal of Physics: Conference Series (JPCS), 2016, v. 697, 012024.
9. Vasiliev G., Imomnazarov Kh., Kalimoldayev M., Mamasoliyev B.J Cauchy Problem for System of the Burgers Equations Arising in the Two-velocity Hydrodynamics // Math. Model. Nat. Phenom. Vol. 12, No. 3, 2017, pp. 134-138.
10. Васильев Г.С., Жиан-Ган Тан, Мамасолиев Б.Ж. Инвариантные подмодели системы уравнений двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению // СЭМИ, 2018, т. 15, с. 585-602.
11. Imomnazarov Sh., Imomnazarov Kh., Kholmurodov A., Dilmurodov N., Mamatkulov M. On a Problem Arising in a Two-Fluid Medium // International Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2018, No. 5(4), pp. 95-100.
12. Имомназаров Х.Х., Турдиев У.К. Исследование задачи Коши для одномерной системы уравнений типа Бюргерса методом слабой аппроксимации // Проблемы информатики, 2019, No. 3, с. 20-30.
13. Ulugbek Turdiyev and Kholmratzhon Imomnazarov A system of equations of the two-velocity hydrodynamics without pressure // AIP Conference Proceedings 2365, 070002 (2021).
14. Эркинова Д.А., Имомназаров Б.Х., Имомназаров Х.Х. Одномерная система уравнений типа Хопфа // Региональная научно-практ. конф. «ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых», 12-16 апреля 2021 г., Хабаровск, с. 61-69.
15. Эркинова Д.А., Имомназаров Б.Х., Имомназаров Х.Х. Задача Коши для одномерной системы уравнений типа Хопфа // Республика конференцияси «Глобаллашув даврида математика ва амалий математиканинг долзарб масалалари» 1-2 июнь 2021 й, Т. 1, с. 412-416.

16. Имомназаров Б.Х., Эркинова Д.А., Имомназаров Х.Х. Задача Коши для одной квазилинейной системы // Тезисы докладов респ. научной конференции с участием зарубежных ученых "Сарымсаковские чтения", 16-18 сентября 2021 г., г. Ташкент, с. 66-67.
17. Имомназаров Х.Х., Мукимов А.Х., Салаев Д.К. Одномерная обратная задача для системы уравнений типа Хопфа // Материалы межд. научно-практич. конфер. «Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий», 11-12 мая, 2022 г. Бухара, с. 209-210.
18. Имомназаров Х.Х., Искандаров И.К., Куйлиев С.Б., Урев М.В. Краевая задача для одной не-реопределенной системы, возникающей в двухжидкостной гидродинамике // Математические заметки СВФУ, 2022, т. 29, No. 1, с. 14-24.
19. Имомназаров Б.Х., Имомназаров Ш.Х., Маматкулов М.М., Худайназаров Б.Б. Фундаментальное решение для стационарного уравнения двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению в диссипативном приближении // СибЖИМ, 2022, т. 25, No. 3, С. 33-40.
20. Имомназаров Х.Х. Об одной краевой задаче, возникающей в двухжидкостной среде // Межд-национальная научная конференция "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", 06 – 08 октября 2022 года г. Ташкент, с. 22-23.
21. Vasiliev S.G, Imomnazarov Kh.Kh., Mamasoliev B.J. Studing a non-dissipative system of the two-velocity hydrodynamics // Abstracts of the Uzbekistan-Malaysia international conference "Computational models and technologies", September 16-17, 2022, Tashkent, Uzbekistan, pp. 125.
22. Имомназаров Б.Х., Салаев Д.К., Искандаров И.К. Задача Коши одномерной системы уравнений типа Хопфа // Региональная научно-практ. конф. «ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых», 12-16 апреля 2022 г., Хабаровск, с. 9-16.
23. Имомназаров Б.Х., Салаев Д.К., Искандаров И.К. Об одной обратной задаче для одномерной системы уравнений типа Хопфа // Far East Math: материалы национальной научной конференции, 2022 г., Хабаровск, с. 3-10.
24. Imomnazarov B.Kh., Turdiev U.K., Erkinova D.A. Weak approximation method for the Cauchy problem for a one-dimensional system of Hopf-type equations // Mathematical Notes of NEFU, 2022, 29(4), pp. 11–20.
25. Шабат А.Б. О периодических решениях уравнений Хопфа // ТМФ, 2013, т. 177, No. 2, С. 222-230.

KUPRATLI O'TA O'TKAZGICHLARDA T_c NING STRUKTURAVIY VA FIZIK
PARAMETRLARIGA BOG'LIQLIGINI MODELLASHTIRISH

Djurayev Davron Raxmonovich,

Buxoro davlat universiteti Fizika kafedrası professori

s.s.fayziev@buxdu.uz

Fayziyev Shaxobiddin Shavkatovich,

Buxoro davlat universiteti Fizika kafedrası dotsenti

d.r.djuraev@buxdu.uz

Radjabova Munavvar Sodiqovna,

Buxoro davlat universiteti magistranti

radzabovam2407@mail.ru

Annotatsiya. Ushbu maqolada kupratli o'ta o'tkazgichlarning kritik harorati bilan ularning strukturaviy va fizik parametrlarining o'zaro bog'liqligini modellashtirish masalasi ko'rib chiqiladi. Maqolaning asosiy vazifasi faqat yarim empirik modelni taqdim etish bilan cheklanmay, balki grafiklarni qurishning butun zanjirini – adabiyotdagi boshlang'ich bog'lanishdan va ishchi nuqtalar jadvalidan tortib, yakuniy hisobiy egri chiziq hamda natijaning fizik talqiniga qadar – ochiq va tushunarli ko'rsatishdan iborat. Asosiy fenomenologik bog'lanish sifatida teshikli dopinglangan kupratlar uchun Presland tomonidan taklif etilgan nashr qilingan model qo'llaniladi, $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ tizimi uchun esa Liang, Bonn va Hardy tomonidan taklif etilgan tekislikdagi doping darajasi bilan panjara parametrining c o'qi bo'ylab qiymati orasidagi empirik bog'lanishdan foydalaniladi. Maqolada kritik haroratni to'g'ri modellashtirish uchun elektron parametr p bilan bir qatorda, kislorodning nostexiometriyasi, panjara parametri va material oilasiga xos elektron tuzilma xususiyatlarini ham hisobga olish zarurligi ko'rsatiladi. Shuningdek, har bir rasmning kelib chiqishi, boshlang'ich jadvallarning tarkibi va qo'llanilgan barcha formulalarning fizik mazmuni alohida izohlanadi.

Kalit so'zlar: kupratli o'ta o'tkazgichlar, kritik harorat, modellashtirish, strukturaviy parametrlar, fizik parametrlar, YBCO, LSCO, Bi-2212, doping, panjara parametri, yarim empirik model.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ T_c КУПРАТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ОТ
СТРУКТУРНЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Аннотация. В данной статье рассматривается задача моделирования взаимосвязи между критической температурой и структурными и физическими параметрами купратных сверхпроводников. Основная цель работы заключается не только в представлении полуэмпирической модели, но и в открытом и понятном показе всего процесса построения графиков - от исходных зависимостей в литературе и таблиц рабочих точек до окончательной вычисленной кривой и физической интерпретации результата. В качестве основной феноменологической зависимости используется опубликованная модель Присленд для дырочно легированных купратов, а для системы $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ эмпирическая зависимость между уровнем легирования на плоскости и параметром решетки c , предложенная Лианг, Бицнн и Харди. Показано, что для корректного моделирования критической температуры необходимо учитывать не только электронный параметр p , но и ностехиометрию кислорода, параметры решетки и электронную структуру, характерную для конкретного семейства материалов. Кроме того, отдельно поясняется происхождение каждой фигуры, состав исходных таблиц и физический смысл всех использованных формул.

Ключевые слова: купратные сверхпроводники, критическая температура, моделирование, структурные параметры, физические параметры, YBCO, LSCO, Bi-2212, легирование, параметр решетки, полуэмпирическая модель.

MODELING THE DEPENDENCE OF T_c IN CUPRATE SUPERCONDUCTORS ON
STRUCTURAL AND PHYSICAL PARAMETERS

Abstract. This paper addresses the problem of modeling the relationship between the critical temperature and the structural and physical parameters of cuprate superconductors. The main goal of the

study is not only to present a semi-empirical model but also to clearly and transparently demonstrate the entire process of constructing graphs - from the initial literature data and working point tables to the final computed curve and the physical interpretation of the results. As the main phenomenological relationship, the published Presland model is used for hole-doped cuprates, while for the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ system, the empirical relationship between the planar doping level and the c-axis lattice parameter proposed by Liang, Bonn, and Hardy is applied. It is shown that for accurate modeling of the critical temperature, it is necessary to consider not only the electronic parameter p but also oxygen non-stoichiometry, lattice parameters, and electronic structure characteristics specific to the material family. Additionally, the origin of each figure, the composition of the initial tables, and the physical meaning of all applied formulas are explained.

Keywords: cuprate superconductors, critical temperature, modeling, structural parameters, physical parameters, YBCO, LSCO, Bi-2212, doping, lattice parameter, semi-empirical model.

Mis saqlovchi oksid tizimlarida yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikning kashf etilishi zamonaviy kondensatlangan holat fizikasi tarixidagi muhim voqealardan biri bo'ldi. Kuprat materiallar qisqa vaqt ichida chuqur fundamental va amaliy qiziqish uyg'otgan obyektlarga aylandi. Bunga ularning qatlamli tuzilishi, kuchli elektron korrelyatsiyalari va an'anaviy o'ta o'tkazgichlarga nisbatan ancha yuqori kritik haroratlari sabab bo'ldi [1, 6, 9].

Kupratli o'ta o'tkazgichlar murakkab qatlamli tizimlar bo'lib, ularda asosiy rolni CuO_2 tekisliklari bajaradi. Aynan shu tekisliklardagi zaryad tashuvchilar holati, ularning doping darajasi va atomlararo o'zaro ta'sir xususiyati o'ta o'tkazuvchanlikning paydo bo'lishi hamda barqarorligini belgilaydi. Shu bilan birga, to'plangan tajriba ma'lumotlari kritik harorat T_c ni faqat zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi bilan to'liq tushuntirib bo'lmagligini ko'rsatadi. Demak, T_c ni tavsiflashda struktura va elektron tuzilishga oid qo'shimcha omillarni ham hisobga olish zarur [6, 9].

Ushbu maqolaning maqsadi kritik haroratning material parametrlariga bog'liqligini modellashtirishning shaffof va fizik jihatdan izohlanadigan sxemasini qurishdan iborat. Ishda grafiklarning kelib chiqishi, boshlang'ich jadvallar tarkibi, formulalarning mazmuni va bir modeldan ikkinchisiga o'tish mantiqi alohida ko'rsatib beriladi.

4. Teshikli dopinglangan kupratlar fizikasi bo'yicha eng mashhur natijalardan biri – normallashtirilgan kritik haroratning teshikli doping darajasiga parabolik bog'liqligidir. Presland va hamkorlarining klassik ishida ushbu bog'lanish qulay fenomenologik ko'rinishda yozilgan va u keyinchalik kupratlar faza diagrammasini tasvirlashda keng qo'llanilgan. Biroq bu yondashuv, avvalo, boshlang'ich yaqinlashuv sifatida qaralishi kerak, chunki turli material oilalarida $T_{c,max}$ va gumbaz shakli bir-biridan farq qiladi [2].

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ tizimi uchun tekislikdagi doping darajasini to'g'ri aniqlash alohida ahamiyatga ega. Liang, Bonn va Hardy YBCO uchun p darajasi panjara parametrining c o'qi bo'ylab qiymati bilan bog'lanishi mumkinligini ko'rsatdilar. Bu natija strukturaviy kattalikdan elektron parametrga o'tish imkonini beradi va shu sababli modellashtirish nuqtai nazaridan juda muhimdir [7].

Pavarini va hamkorlarining ishlari $T_{c,max}$ bo'yicha material oilalari orasidagi farqlar elektron tuzilmaning materialga xos xususiyatlari, xususan axial orbital hamda tekislik ichidagi uzoq masofali hopping bilan bog'liq parametrlar bilan korrelyatsiyalanganini ko'rsatdi. Demak, oilalar orasidagi farqni tushuntirish uchun faqat dopingni emas, balki strukturaviy-elektron omillarni ham hisobga olish kerak [5, 8].

Shunday qilib, adabiyotlar tahlili T_c ni yetarli darajada tavsiflash uchun kamida uchta daraja zarurligini ko'rsatadi: asosiy $T_c(p)$ bog'lanishi, muayyan material oilalari uchun strukturaviy bog'lanish va fizik parametrlarni ham hisobga oluvchi kengaytirilgan sxema [2, 5, 7, 10].

Maqolaning ushbu variantida boshlang'ich ma'lumotlar sifatida muallifning o'z eksperimental o'lchovlari emas, balki nashr qilingan tenglamalar va adabiyotlarda keltirilgan parametr qiymatlari asosida qayta tiklangan ishchi nuqtalar jadvallari qabul qilinadi. Ya'ni barcha grafiklar muallif tomonidan qayta qurilgan bo'lib, ularning sonli asosi sifatida e'lon qilingan formulalar xizmat qiladi [2, 7].

Materiallar va modellashtirish metodikasi. Taqqoslama tahlil uchun kupratli yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarning uchta vakil oilasi tanlandi: LSCO, YBCO va Bi-2212. Ushbu tizimlar adabiyotlarda yaxshi o'rganilgan, ularning kristall-kimyoviy xususiyatlari bir-biridan farq qiladi va ular kritik haroratning doping hamda strukturaviy omillarga qanday bog'liqligini ko'rsatish uchun qulaydir [2, 7, 9].

Bog'liq kattalik sifatida kritik harorat T_c qabul qilinadi. Modellashtirishning birinchi darajasida mustaqil o'zgaruvchi sifatida teshikli doping darajasi p olinadi. Ikkinchi darajada YBCO uchun panjara parametrining c o'qi bo'ylab qiymati kiritiladi va u orqali $p(c)$ bog'lanishi aniqlanadi. Uchinchi darajada esa

kengaytirilgan ko'p parametrlı sxema qo'llanadi, unda kislorod nostexiometriyasi, strukturaviy-elektron deskriptor va o'ta o'tkazuvchi kondensat bilan bog'liq parametrlar hisobga olinadi [2, 10].

1-jadval. Rasmlarning kelib chiqishi va boshlang'ich ma'lumotlar turi.

Rasm	Nima ko'rsatilgan	Manba	Ma'lumot turi
1	Tc(p) ning oilaga bog'liq egri chiziqlari	Presland et al.	E'lon qilingan formula bo'yicha rekonstruksiya
2	Tc/Tcmax(p) ning normallashtirilgan bog'lanishi	Presland et al.	E'lon qilingan formula bo'yicha rekonstruksiya
3	YBCO uchun p(c) bog'lanishi	Liang, Bonn, Hardy	E'lon qilingan formula bo'yicha rekonstruksiya
4	YBCO uchun Tc(c) kompozitsion modeli	Presland + Liang	Ikkita e'lon qilingan formula bo'yicha kompozitsion hisob

Izoh. Ushbu variantdagi 1-4 rasmlarning barchasi muallif tomonidan qayta qurilgan; ularning sonli asosi e'lon qilingan tenglamalar va adabiyotdagi Tc ning maksimal qiymatlari bo'lib, ular muallifning o'z eksperimental o'lchovlari sifatida talqin qilinmaydi [2, 7].

Maqolaning ushbu variantidagi ishchi nuqtalar jadvallari nashr qilingan formulalar asosida hisoblangan jadvallar maqomiga ega. Ular eksperimental grafiklarning to'liq raqamlashtirilgan nusxasini almashtirmaydi, biroq formuladan grafikgacha bo'lgan zanjirni tushunarli va tekshirsa bo'ladigan ko'rinishda ko'rsatishga xizmat qiladi [2, 7].

2-jadval. Hisob-kitobda qo'llanilgan kuprat oilalari va Tc(p) ning asosiy funksiyalari.

Oila	Tc(p) funksiyasi	Tc ning maksimum manbai	Ishdagi roli
LSCO	$38[1-82.6(p-0.16)^2]$	adabiy qiymatlar	Asosiy taqqoslash
YBCO	$93[1-82.6(p-0.16)^2]$	adabiy qiymatlar	Asosiy taqqoslash va strukturaviy bog'lanish
Bi-2212	$95[1-82.6(p-0.16)^2]$	adabiy qiymatlar	Asosiy taqqoslash

Modellashtirishning birinchi darajasi uchun kritik haroratning teshikli doping darajasiga nashr qilingan parabolik bog'liqligi qo'llanadi. Ushbu model kuprat o'ta o'tkazgichlari uchun xos bo'lgan gumbazsimon Tc(p) shaklini tiklaydi va ishda boshlang'ich nazorat modeli sifatida xizmat qiladi [2].

$$T_c = T_{c,max} [1 - 82,6 (p - 0,16)^2] \quad (1)$$

bu yerda T_c - o'ta o'tkazuvchan o'tishning kritik harorati, K ; $T_{c,max}$ - mazkur oila uchun maksimal kritik harorat, K ; p - CuO_2 tekisliklaridagi teshikli doping darajasi; 0,16 - optimal doping qiymati; 82,6 - o'ta o'tkazuvchanlik gumbazining egriligini belgilovchi empirik koeffitsiyent.

(1)-formula fizik jihatdan shuni anglatadiki, kritik harorat optimal dopingda maksimumga erishadi va tizim bu qiymatdan kam yoki ko'p dopinglangan tomonga og'ganda pasaya boshlaydi [2].

a. Shu bog'lanishning normallashtirilgan ko'rinishi

$$1 - \frac{T_c}{T_{c,max}} = 82,6 (p - 0,16)^2 \quad (2)$$

bu yerda $T_c/T_{c,max}$ - normallashtirilgan kritik harorat; p - teshikli doping darajasi.

Normallashtirilgan ko'rinish oilalararo taqqoslash uchun qulay, chunki u bog'lanishni o'lchamsiz shaklga keltiradi va $T_{c,max}$ ning mutlaq qiymatlaridan qat'i nazar gumbazning umumiy shaklini muhokama qilish imkonini beradi [2].

Modelning oilaga bog'liq ko'rinishi.

$$T_c(f) = T_{c,max}(f) [1 - A_f (p - p_{0,f})^2], \quad (3)$$

bu yerda $T_c(f)$ - f oilaga mansub material uchun kritik harorat; $T_{c,max}(f)$ - ushbu oilaning maksimal kritik harorati; A_f - o'ta o'tkazuvchanlik gumbazining kengligini belgilovchi koeffitsiyent; $p_{0,f}$ mazkur oilaga xos optimal doping darajasi.

(3)-formula turli oilalar bir-biridan nafaqat $T_{c,max}$ qiymati, balki optimal doping holati va gumbaz shakli bo'yicha ham farq qilishi mumkinligini hisobga olishga imkon beradi [2, 5].

b. YBCO uchun empirik p(c) bog'lanishi

$YBa_2Cu_3O_{6+x}$ tizimi uchun tekislikdagi doping darajasini panjara parametrining c o'qi bo'ylab qiymati bilan bog'laydigan nashr qilingan empirik formula qo'llanadi [7].

$$p = 11,491 y + 5,17 \times 10^9 y^6, \quad y = 1 - c/c_0, \quad c_0 = 1,18447 \text{ nm}, \quad (4)$$

bu yerda p - teshikli doping darajasi; y - yordamchi o'lchamsiz kattalik; c - panjara parametrlining c o'qi bo'ylab qiymati; c_0 - panjara parametrlining tayanch qiymati; 11,491 va $5,17 \times 10^9$ - empirik yaqinlashtirish koeffitsiyentlari.

(4)-formulaning fizik ma'nosi shundan iboratki, materialning strukturasi elektron tizimga ta'sir qiladi: panjara parametrlining c qiymati o'zgarganda tekislikdagi doping darajasi ham o'zgaradi. Shu sababli c parametri T_c ni modellashtirishda fizik mazmunli strukturaviy ko'rsatkich sifatida qaraladi [7].

YBCO uchun $T_c(c)$ kompozitsion modeli

$$T_c = T_{c,max} [1 - 82,6 (p(c) - 0,16)^2], \quad (5)$$

bu yerda $p(c)$ - panjara parametri c orqali ifodalangan doping darajasi; $T_{c,max}$ - YBCO oilasi uchun maksimal kritik harorat.

(5) - formula modelning strukturaviy va elektron qismlarini birlashtiradi: avval c dan $p(c)$ aniqlanadi, so'ng $p(c)$ orqali kritik harorat hisoblanadi. Aynan shu formula 4-rasm va 5-jadvalning asosini tashkil etadi [2, 7].

Kengaytirilgan ko'p parametrlil sxema

$$T_c = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 \delta + a_4 c + a_5 S + a_6 \rho_s, \quad (6)$$

bu yerda $a_0 \dots a_6$ - ko'p parametrlil model koeffitsiyentlari; δ - kislorod nostexiometriyasi; c - panjara parametrlining c o'qi bo'ylab qiymati; S - material oilasiga xos strukturaviy-elektron deskriptor; ρ_s - o'ta o'tkazuvchi kondensat bilan bog'liq parametr yoki o'ta oqim zichligi.

(6) - formula yakuniy kengaytirilgan modelning umumiy ko'rinishini beradi. Ushbu hujjatda u keyingi rivojlantirish uchun ishchi sxema sifatida keltiriladi, sonli grafiklar esa asosan (1) - (5) formulalar asosida qurilgan [5, 8, 10].

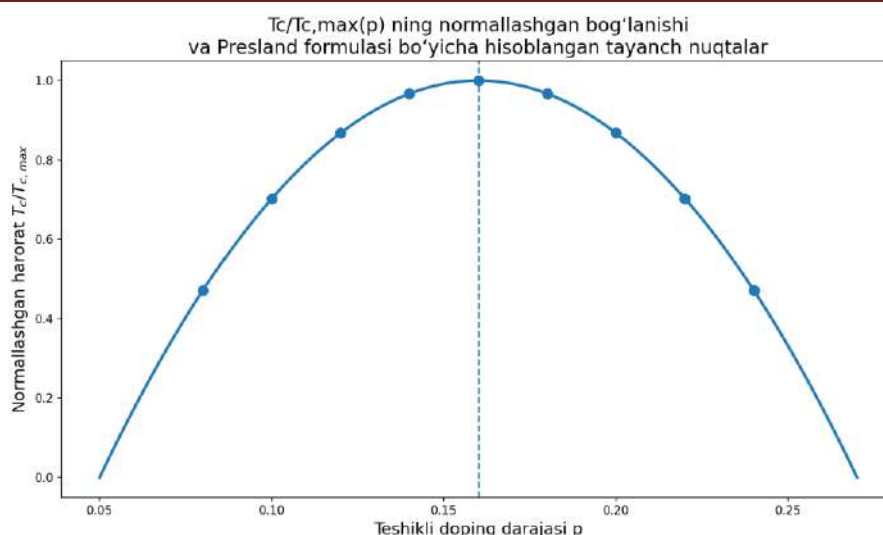
Boshlang'ich jadvallar va muallif tomonidan qurilgan grafik-rekonstruksiylar $T_c/T_{c,max}(p)$ ning normallashtirish bog'lanishi

Birinchi grafik uchun boshlang'ich sonli asos sifatida Presland bog'lanishining normallashtirish ko'rinishi bo'yicha bevosita hisoblangan tayanch nuqtalar jadvali olinadi. Bu nuqtalar eksperimental nuqtalar emas, balki adabiyotda berilgan formulani shaffof sonli ko'rinishga keltirish uchun tuzilgan ishchi jadvaldir [2].

3-jadval. $T_c/T_{c,max}(p)$ ning normallashtirish bog'lanishi uchun tayanch nuqtalarning ishchi jadvali

№	p	$T_c/T_{c,max}$	Izoh
1	0.08	0.4714	Presland formulasi bo'yicha hisob
2	0.1	0.7026	Presland formulasi bo'yicha hisob
3	0.12	0.8678	Presland formulasi bo'yicha hisob
4	0.14	0.967	Presland formulasi bo'yicha hisob
5	0.16	1.0	Presland formulasi bo'yicha hisob
6	0.18	0.967	Presland formulasi bo'yicha hisob
7	0.2	0.8678	Presland formulasi bo'yicha hisob
8	0.22	0.7026	Presland formulasi bo'yicha hisob
9	0.24	0.4714	Presland formulasi bo'yicha hisob

Izoh. 3-jadvaldagi qiymatlar (2)-formula bo'yicha hisoblangan va 1-rasmni qurish uchun shaffof sonli asos sifatida ishlatiladi. [2].



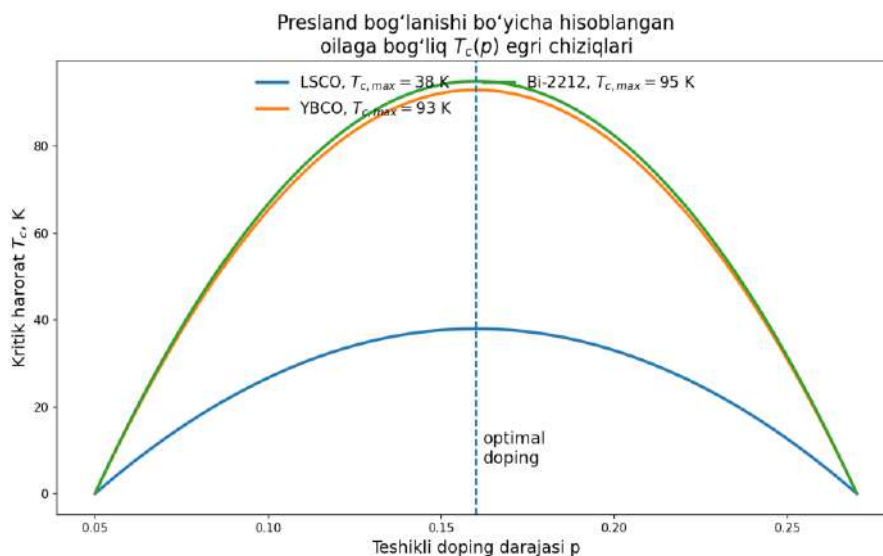
1-rasm. $T_c/T_{c,max}$ ning teshikli doping darajasi p ga bog'liqligi va hisoblangan tayanch nuqtalar

Grafik manbai: Presland va hamkorlarining e'lon qilingan bog'lanishi asosida muallif tomonidan qayta qurilgan grafik. Formula va belgilarning sharhi keltirilgan [2].

1-rasmdan normallashtirilgan kritik harorat $p = 0,16$ da birga teng bo'lishi va optimal dopingdan uzoqlashgan sari simmetrik tarzda kamayishi ko'rinadi. To'liq eksperimental maqola uchun keyingi bosqichda real adabiyot grafigidan olingan nuqtalarni raqamlashtirish maqsadga muvofiq bo'ladi [2].

LSCO, YBCO va Bi-2212 oilalarini taqqoslash.

Ikkinchi grafik bir xil Presland asosiy bog'lanishi bo'yicha, biroq $T_{c,max}$ ning turli adabiy qiymatlari bilan quriladi. Shu sababli 2-rasm normallashtirilgan egri chiziqlari emas, balki oilalarga bog'liq $T_c(p)$ grafigini ko'rsatadi [2, 7, 9].



2-rasm. LSCO, YBCO va Bi-2212 uchun oilaga bog'liq $T_c(p)$ egri chiziqlari

Grafik manbai: kupratlarning uchta oilasi uchun adabiyotda keltirilgan $T_{c,max}$ qiymatlari bilan (1)-formula asosida muallif tomonidan qayta qurilgan grafik [2, 7].

2-rasm modellashtirishning birinchi darajasidagi taqqoslama grafik vazifasini bajaradi. Uning asosiy vazifasi o'ta o'tkazuvchanlik gumbazining umumiy skeletini ko'rsatish va oilalar orasidagi gumbaz balandligi farqini darhol ochib berishdir. Aynan shu bosqichda faqat bitta umumiy egri chiziq barcha kupratlarni to'liq tushuntirib bera olmasligi ayon bo'ladi [5, 9].

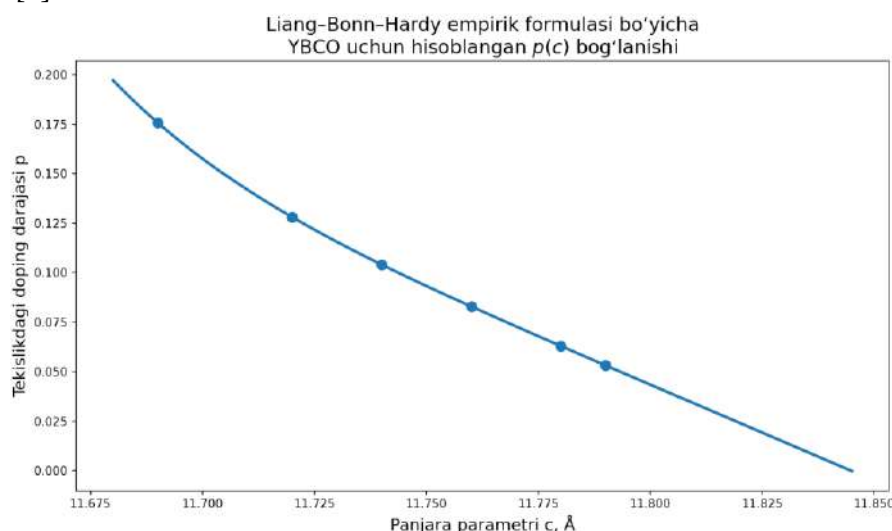
YBCO uchun boshlang'ich $p(c)$ bog'lanishi.

YBCO tizimi uchun ishchi jadval endi p o'zgaruvchisi bo'yicha emas, balki panjara parametrining c qiymati bo'yicha tuziladi. Avval Liang – Bonn –Hardy formulasi yordamida $p(c)$ aniqlanadi, so'ng shu qiymatlar grafik ko'rinishida tasvirlanadi [7].

4-Jadval. YBCO da $p(c)$ bog'lanishi uchun boshlang'ich nuqtalarning ishchi jadvali.

№	$c, \text{\AA}$	$p(c)$	Izoh
1	11.69	0.1757	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
2	11.72	0.128	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
3	11.74	0.104	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
4	11.76	0.0829	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
5	11.78	0.0629	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
6	11.79	0.0531	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob

Izoh. 4-jadvaldagi $p(c)$ qiymatlari (4)-formula bo'yicha hisoblangan. Ushbu jadval 3-rasming sonli asosini tashkil etadi [7].



3-rasm. YBCO uchun $p(c)$ ning hisobiy bog'lanishi

3-rasm maqoladagi eng muhim rasmlardan biri hisoblanadi, chunki u strukturaviy o'zgaruvchidan elektron o'zgaruvchiga o'tishni ko'rsatadi. Natijada c panjara parametri shunchaki yordamchi xususiyat bo'lib qolmay, balki kritik haroratni modellashtirishda fizik mazmunli kirish parametri sifatida qaraladi [7].

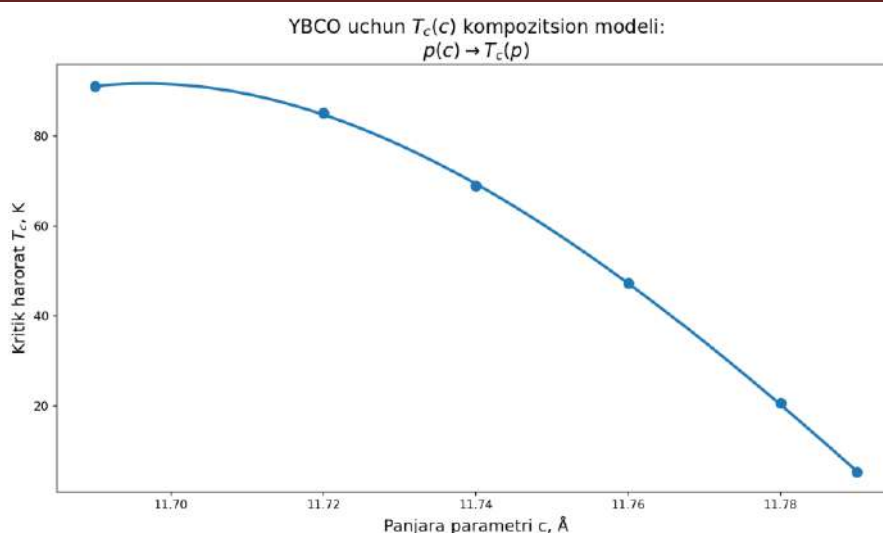
YBCO uchun $T_c(c)$ kompozitsion modeli.

$P(c)$ aniqlangandan so'ng topilgan p qiymati asosiy $T_c(p)$ bog'lanishiga qo'yilib, YBCO uchun kritik haroratga o'tiladi. Shu tariqa struktura va o'ta o'tkazuvchanlikni birlashtiruvchi $T_c(c)$ kompozitsion modeli hosil qilinadi. [2, 7]

5-jadval. YBCO uchun $T_c(c)$ kompozitsion modelining ishchi jadvali.

№	$c, \text{\AA}$	$p(c)$	$T_c(c), K$	Izoh
1	11.69	0.1757	91.1	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
2	11.72	0.128	85.14	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
3	11.74	0.104	68.94	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
4	11.76	0.0829	47.29	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
5	11.78	0.0629	20.58	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob
6	11.79	0.0531	5.24	Liang + Presland formulalari bo'yicha hisob

Izoh. 5-jadvaldagi $T_c(c)$ qiymatlari (4) va (5)-formular ketma-ket qo'llanishi orqali olingan [2, 7].



4-rasm. YBCO uchun $T_c(c)$ kompozitsion modeli: $p(c) \rightarrow T_c(p)$

Grafik manbai: ikkita e'lon qilingan formula - $p(c)$ uchun Liang–Bonn–Hardy va $T_c(p)$ uchun Presland - asosida muallif tomonidan qayta qurilgan grafik. [2, 7]

Aynan 4-rasm maqolaning asosiy g'oyasini bevosita amalga oshiradi: kritik harorat strukturaviy parametr bilan to'g'ridan-to'g'ri emas, balki fizik mazmunli oraliq o'zgaruvchi – doping darajasi orqali bog'lanadi [2, 7].

Modellashtirish natijalari va ularning muhokamasi.

Ko'rib chiqilgan grafiklar $T_c(p)$ ning asosiy parabolik bog'lanishi teshikli dopinglangan kupratlar uchun foydali birinchi yaqinlashuv ekanini ko'rsatadi. Biroq LSCO, YBCO va Bi-2212 oilalari taqqoslanganda bir xil funktsiya shakli oilalararo barcha farqlarni tushuntirib bera olmasligi darhol ko'rinadi [2].

YBCO uchun panjara parametrining c qiymati orqali kiritilgan strukturaviy bog'lanish alohida ahamiyatga ega. $p(c) - T_c(p)$ ketma-ketligi modelni fizik jihatdan talqin qilinadigan shaklga keltiradi: bunda struktura dopingga, doping esa kritik haroratga ta'sir qiladi [7].

(6) - formula bilan berilgan kengaytirilgan ko'p parametrlil model maqolani rivojlantirishning keyingi bosqichini belgilaydi. U kislorod nostexiometriyasi, oilaga xos strukturaviy-elektron deskriptor va o'ta o'tkazuvchi kondensatga oid parametrlarni ham kiritish imkonini beradi. Shu ma'noda, qayta ishlangan maqola birgina grafik bilan cheklanmay, bosqichma-bosqich chuqurlashtiriladigan modellashtirish sxemasini taklif qiladi [5, 8, 10].

Metodik nuqtai nazardan ishning asosiy natijasi faqat modelning o'zi emas, balki dalillash zanjirining to'g'ri tashkil etilganidadir. Endi maqolada har bir egri chiziqli qayerdan olingani, uning asosida qanday jadval yotgani va formula qanday fizik mazmunga ega ekani aniq ko'rsatilgan. Bu esa hujjatni avvalgi variantga nisbatan ancha ishonchli va ilmiy jihatdan puxta qiladi.

Xulosa. Ushbu maqolada kupratli o'ta o'tkazgichlarning kritik harorati bilan ularning strukturaviy va fizik parametrlarini bog'lovchi modellashtirishning shaffof sxemasi ishlab chiqildi. Asosiy $T_c(p)$ modeli boshlang'ich tayanch sifatida olindi, YBCO uchun strukturaviy $p(c)$ bog'lanishi kiritildi va natijada $T_c(c)$ kompozitsion ko'rinishga o'tish amalga oshirildi.

Asosiy xulosalar: Preslandning parabolik bog'lanishi teshikli dopinglangan kupratlar uchun asosiy bir omilli model sifatida qo'llanishi mumkin. YBCO da c strukturaviy parametri tekislikdagi doping darajasining fizik mazmunli prediktor sifatida ishlatilishi mumkin. $T_c(c) = T_c[p(c)]$ kompozitsion sxemasi material strukturasi bilan uning o'ta o'tkazuvchi xossalari bevosita bog'lash imkonini beradi. Kengaytirilgan ko'p parametrlil modelga faqat p emas, balki δ , c , S va p_s ham kiritilishi lozim.

ADABIYOTLAR:

1. Bednorz J. G., Müller K. A. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system // *Zeitschrift für Physik B*. 1986. Vol. 64. P. 189–193.
2. Presland M. R., Tallon J. L., Buckley R. G., Liu R. S., Flower N. E. General trends in oxygen stoichiometry effects on T_c in Bi and Tl superconductors // *Physica C*. 1991. Vol. 176. P. 95–105.

3. Uemura Y. J. et al. *Universal correlations between T_c and ns/m^* in high- T_c cuprate superconductors* // *Physical Review Letters*. 1989. Vol. 62. P. 2317–2320.
4. Orenstein J., Millis A. J. *Advances in the physics of high-temperature superconductivity* // *Science*. 2000. Vol. 288. P. 468–474.
5. Pavarini E., Dasgupta I., Saha-Dasgupta T., Jepsen O., Andersen O. K. *Band-structure trend in hole-doped cuprates and correlation with $T_{c,max}$* // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 87. 047003.
6. Lee P. A., Nagaosa N., Wen X.-G. *Doping a Mott insulator: Physics of high-temperature superconductivity* // *Reviews of Modern Physics*. 2006. Vol. 78. P. 17–85.
7. Liang R., Bonn D. A., Hardy W. N. *Evaluation of CuO_2 plane hole doping in $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ single crystals* // *Physical Review B*. 2006. Vol. 73. 180505(R).
8. Sakakibara H., Usui H., Kuroki K., Arita R., Aoki H. *Orbital mixture effect on the Fermi-surface- T_c correlation in the cuprates* // *Physical Review B*. 2014. Vol. 89. 224505.
9. Keimer B., Kivelson S. A., Norman M. R., Uchida S., Zaanen J. *From quantum matter to high-temperature superconductivity in copper oxides* // *Nature*. 2015. Vol. 518. P. 179–186.
10. Božović I., He X., Wu J., Bollinger A. T. *Dependence of the critical temperature in overdoped copper oxides on superfluid density* // *Nature*. 2016. Vol. 536. P. 309–311.

**NIوبي YUPQA PLYONKALARINING KRISTALL TUZILISHI
VA SIRT MORFOLOGIYASI**

Qodirov Asilbek Raxmon o'g'li,

Nazariy va eksperimental fizika kafedrası tayanch doktoranti

Qarshi davlat universiteti

asilbekqodirov980@gmail.com,

Namozova Oybarchin Ulash qizi,

Qarshi davlat universiteti Fizika yo'nalishi magistri

oybarchinnamozova229@gmail.com,

Jabborova Mahbuba Ofarin qizi,

Qattiq jismlar fizikasi kafedrası magistri

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti

mahbubajabborova5@gmail.com

Annotatsiya. Biz ushbu tadqiqot davomida magnetron changlatish qurilmasining DC va RF rejimlarida turli xil vaqt davomida Nb yupqa plyonkalarini hosil qildik va ularni changlatish rejimlariga bog'liq sirt morfologiyasi hamda Rentgen faza tahlillarini o'rgandik. Plyonkalar 2,5 va 8 minut davomida magnetron changlatish qurilmasining DC va RF rejimlari yordamida monokristall **Si(111)** tagliklarga yotqizildi. Nb yupqa plyonkalarining strukturaviy, morfologik xossalari skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), miqdoriy tahlili EDS, hamda plyonkalarining strukturaviy, morfologik va kompozitsion xususiyatlari rentgen difraktsiyasi (XRD) yordamida har tomonlama tadqiq etildi. SEM kuzatuvlari plyonkaning silliq va zich mikrostrukturaga ega ekanligini ko'rsatgan bo'lsa, XRD tahlili shuni ko'rsatdiki, Nb yupqa plyonkalari tanaga markazlashgan kubik struktura (BCC) da DC purkash uchun dominant (110) afzal yo'nalishga ega kristallanadi, RF purkash esa ko'p kristallografik yo'nalishlarga ega ko'proq polikristalli strukturaga olib keldi. Olingan natijalarga ko'ra kristallit o'lchami DC rejimda purkalgan plyonkalar uchun taxminan 18-25 nm va RF rejimda purkalgan plyonkalar uchun 28-35 nm oralig'ida bo'lgan. Olingan natijalar ushbu tadqiqotda tayyorlangan Nb yupqa plyonkalari yuqori strukturaviy sifatga ega ekanini tasdiqlaydi hamda ularning fotokatalitik qurilmalarda istiqbolli material sifatida qo'llanilishi mumkinligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: DC va RF rejimlar, magnetron changlatish, yupqa plyonka, kristall o'lchami, struktura, morfologiya, mikrostruktura, skanerlovchi elektron mikroskop, niobiy.

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ПОВЕРХНОСТНАЯ МОРФОЛОГИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИОБИЯ

Аннотация. В данном исследовании мы вырастили тонкие пленки Nb в режимах магнетронного распыления постоянного и высокочастотного тока в течение различного времени и изучили их морфологию поверхности и рентгенофазовый анализ в зависимости от режима распыления. Пленки были осаждены на монокристаллические подложки Si(111) с использованием режимов магнетронного распыления постоянного и высокочастотного тока в течение 2, 5 и 8 мин. Структурные и морфологические свойства тонких пленок Nb были всесторонне исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), количественного анализа методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), а структурные, морфологические и композиционные свойства пленок были всесторонне исследованы с помощью рентгеновской дифракции (РД). В то время как наблюдения СЭМ показали, что пленка имеет гладкую и плотную микроструктуру, анализ РД показал, что тонкие пленки Nb кристаллизуются в объемно-центрированной кубической (ОЦК) структуре с преобладающим направлением (110) по оси y при распылении постоянным током, распыление высокочастотным током привело к более поликристаллической структуре с множественными кристаллографическими ориентациями. Согласно полученным результатам, размер кристаллитов составлял приблизительно 18-25 нм для пленок, распыленных в режиме постоянного тока, и 28-35 нм для пленок, распыленных в режиме радиочастотного излучения. Полученные результаты подтверждают, что тонкие пленки ниобия, полученные в данном исследовании, обладают высоким структурным качеством и указывают на возможность их использования в качестве перспективных материалов в фотокаталитических устройствах.

Ключевые слова: режимы постоянного и радиочастотного тока, магнетронное распыление, тонкая пленка, размер кристаллов, структура, морфология, микроструктура, сканирующий электронный микроскоп, ниобий.

CRYSTAL STRUCTURE AND SURFACE MORPHOLOGY OF NIOBIUM THIN FILMS

Abstract. In this study, we have grown Nb thin films in DC and RF modes of magnetron sputtering for different times and studied their surface morphology and X-ray phase analysis depending on the sputtering modes. The films were deposited on single-crystal Si(111) substrates using DC and RF modes of magnetron sputtering for 2, 5 and 8 min. The structural and morphological properties of the Nb thin films were comprehensively investigated by scanning electron microscopy (SEM), quantitative analysis by EDS, and the structural, morphological and compositional properties of the films were comprehensively investigated by X-ray diffraction (XRD). While SEM observations showed that the film had a smooth and dense microstructure, XRD analysis showed that the Nb thin films crystallized in a body-centered cubic (BCC) structure with a dominant (110) preferred y -direction for DC sputtering, RF sputtering resulted in a more polycrystalline structure with multiple crystallographic orientations. According to the results obtained, the crystallite size was approximately 18-25 nm for films sputtered in the DC mode and 28-35 nm for films sputtered in the RF mode. The results obtained confirm that the Nb thin films prepared in this study have high structural quality and indicate that they can be used as promising materials in photocatalytic devices.

Keywords: DC and RF modes, magnetron sputtering, thin film, crystal size, structure, morphology, microstructure, scanning electron microscope, niobium.

Kirish. Nano o'lchamli yupqa plyonkalarni ishlab chiqarish va tavsiflashdagi yutuqlar bugungi fan va texnologiyada sezilarli yutuqlarga olib keladi [1, 2]. Yupqa plyonkalar polimerlar, metallar va metall qotishmalaridan tayyorlanishi mumkin bo'lsa-da, metallardan tayyorlangan yupqa plyonkalar turli xil texnologik sohalarda juda istiqbolli hisoblanadi [3, 4]. Ushbu nano o'lchamli metall yupqa plyonkalarining ishlashi va fizik xususiyatlari ularning qalinligi, zichligi, sirt g'adir-budirligi, kristall tabiati, kristallit hajmi va qoldiq kuchlanishlar kabi mikrostrukturaviy parametrlari bilan chambarchas bog'liq [5, 6]. Ushbu nano o'lchamli metall yupqa plyonkalarining mikrostrukturasi cho'ktirish kamerasing o'ziga xos usuliga, eksperiment sharoitlariga va geometriyasiga sezgir. Shuning uchun, ushbu jarayon parametrlari o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni tushunish, nanoskalali metall yupqa plyonkalarining xususiyatlarini ma'lum ilovalar uchun moslashtirish uchun juda muhimdir.

Boshqa metall yupqa plyonkalardan farqli o'laroq, niobiy (Nb) o'zining fizik, mexanik, issiqlik va elektr xususiyatlari tufayli materialshunoslik sohasidagi tadqiqotchilarni o'ziga jalb qiladi [7, 8]. Niobiy plyonkalari o'ta o'tkazuvchan tizimlar, nanoklastlar, yagona foton detektorlari, yuqori haroratli plazmonik qo'llanmalar va boshqalar kabi turli xil qo'llanmalarda qo'llanilgan [9, 10]. Tadqiqotchilar Nb plyonkalarini yotqizish uchun turli xil eksperimental usullardan foydalanganlar [5-7, 11, 12]. Magnetronli purkash o'zining ajoyib barqarorligi va takrorlanishi tufayli boshqa usullar orasida mashhur usul hisoblanadi. Puflangan yupqa plyonkalarining mikrotuzilishini cho'ktirish bosimi yoki taglik haroratini o'zgartirish orqali adatolarning kinetik energiyasini boshqarish orqali o'zgartirish mumkin [13]. C.Tu va boshqalar [14]. Yuqori taglik haroratida Nb plyonkalarining zich va vertikal ustunli o'sishi yuqori darajadagi kristallik va elektr o'tkazuvchanligiga olib kelishini kuzatdilar. T.C.de Freitas va boshqalar [15]. Si/Nb interfeysida o'zaro diffuziya va/yoki substrat harorati 373 K dan yuqori bo'lgan ichki kuchlanishning kuchayishi Nb o'ta o'tkazuvchanlik xususiyatlarining yomonlashishiga olib kelishini kuzatdilar. Cho'kma bosimi va taglik haroratining Nb plyonka mikrotuzilmasiga ta'siri va uning o'ta o'tkazuvchanlik xususiyatlari bilan bog'liqligi keng tadqiq etilgan bo'lsa-da, cho'kma burchagining Nb yupqa plyonkalarining mikrotuzilmasiga ta'siri bo'yicha tadqiqotlar kamroq [16, 17]. Metall yupqa plyonkalar orasida niobiy (Nb) va uning oksidlari o'ziga xos fizik xususiyatlari tufayli katta ilmiy va texnologik qiziqish uyg'otadi. Sof niobiy past haroratlarda yuqori elektr o'tkazuvchanligi, kimyoviy barqarorlik va o'ta o'tkazuvchanlikni namoyon etadi, bu esa uni o'ta o'tkazuvchan qurilmalar, mikroelektron komponentlar va yuqori chastotali tizimlar uchun istiqbolli qiladi [18, 20]. Shuning uchun kremniy tagliklarida Nb yupqa plyonkalarining hosil bo'lish mexanizmlarini, ularning strukturaviy va elektrofizik xususiyatlarini hamda termik ishlov berish paytida sodir bo'ladigan fazaviy o'zgarishlarni o'rganish muhim tadqiqot muammosini anglatadi.

2.1 Tagliklarni tayyorlash va plyonkani cho'ktirish

Nb yupqa plyonkalari monokristalli kremniy tagliklariga (p-turdagi Si (100)) magnetronli purkash tizimi (EPOS PVD Desk Pro, Rossiya-Germaniya) yordamida o'stirildi. O'stirishdan oldin Si tagliklari izopropil spirti yordamida ultratovushli vannada tozalandi va keyin quritildi [21,23]. Purkash uchun 99,95% tozalik va 76,2 mm diametrli niobiy misheni ishlatilgan. O'stirishdan oldin vakuum kamerasi 5×10^{-6} Torr bosimiga qadar vakuum holatiga keltirildi. Purkash jarayonida ishchi gaz sifatida yuqori tozalikdagi argon gazi (99,999%) ishlatilgan.

2.2 SEM va EDS tahlili

O'stirilgan Nb yupqa plyonkalarining sirt morfologiyasi va qalinligi SEC ALPHA skanerlash elektron mikroskopi (SEM) (SEC Co., Koreya) yordamida o'rganildi. Asbob ikkilamchi elektron (SE) va orqaga sochilgan elektron (BSE) detektorlari bilan jihozlangan. Plyonkalarining elementar tarkibi Oxford Instruments tomonidan ishlab chiqarilgan energiya dispersli rentgen spektroskopiyasi (EDS) tizimi yordamida tahlil qilindi.

2.3. Rentgen difraksiya tahlili (XRD)

Changlatib o'stirilgan Nb yupqa plyonkalarining kristall tuzilishi va fazaviy tarkibi Shimadzu XRD-6100 difraktometri (Shimadzu, Yaponiya) yordamida rentgen difraksiyasi (XRD) yordamida tekshirildi. O'lchovlar Cu K α nurlanishi ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) yordamida $10\text{--}60^\circ$ 2θ diapazonida, skanerlash bosqichi 0.02° bo'lgan holda amalga oshirildi. Difraksiya cho'qqilari tanaga markazlashgan kubik niobiy uchun standart difraksiya ma'lumotlariga muvofiq indekslandi. Tekisliklararo masofa (d) Bragg qonuni $n\lambda = 2d\sin\theta$ yordamida aniqlandi, bu yerda λ tushayotgan rentgen nurlanishining to'liq uzunligi va θ difraksiya burchagi.

Kubik Nb strukturasining panjara parametri $a = d \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$ yordamida hisoblandi.

Kristallitning o'rtacha hajmi (D) Scherrer tenglamasi $D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta}$ yordamida baholandi.

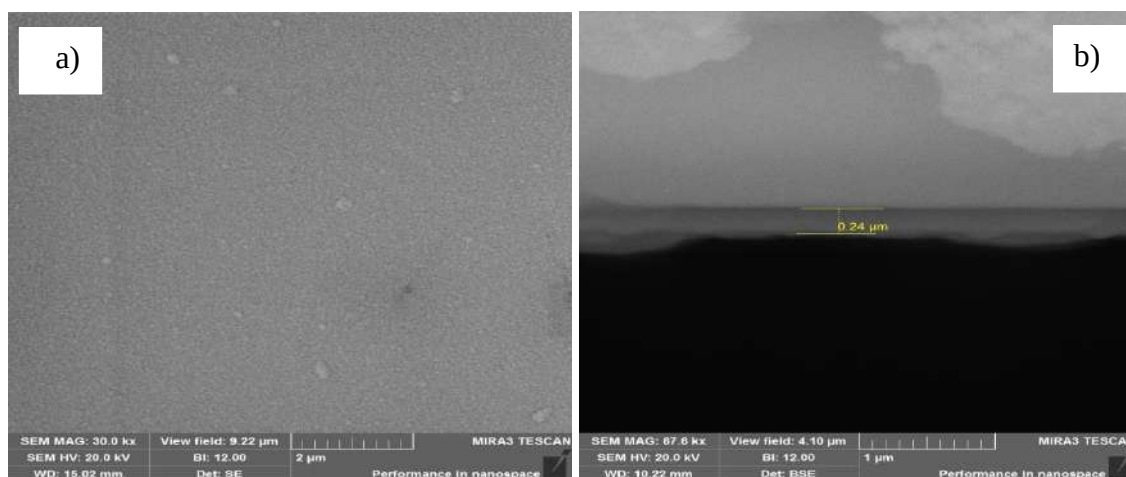
bu yerda β difraksiya cho'qqisining yarim maksimal (FWHM) da to'liq kengligi.

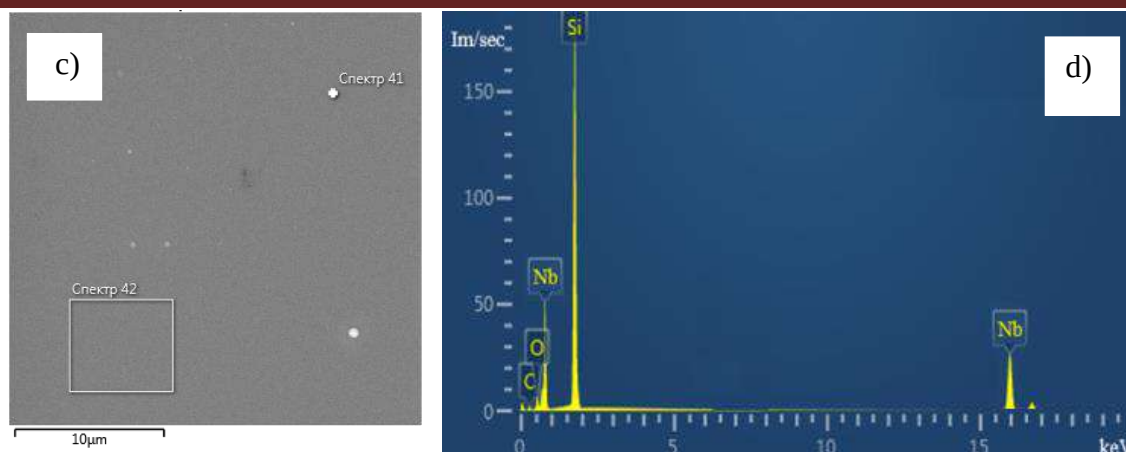
Mikrodeformatsiya (ϵ) va dislokatsiya zichligi (δ) quyidagi munosabatlar yordamida hisoblab chiqildi: $\epsilon = \beta / 4 \tan\theta \delta = 1/D^2$

Ushbu parametrlar turli xil purkash rejimlarida cho'ktirilgan Nb yupqa plyonkalarining strukturaviy sifatini baholash uchun ishlatilgan.

3.1. SEM morfologiyasi, qalinligi tahlili va EDS elementar tahlili.

Si tagliklariga qo'yilgan Nb yupqa plyonkalarining sirt morfologiyasi skanerlovchi elektron mikroskopi (SEM) yordamida tekshirildi. SEM tasvirlari katta aglomeratlar yoki yoriqlarsiz nisbatan bir xil va silliq plyonka morfologiyasini ko'rsatadi. Sirt taglik bo'ylab bir tekis taqsimlangan mayda nano-o'lchamli kristallitlardan iborat bo'lib, bu magnetronli purkash jarayonida barqaror o'sish sharoitlarini va Si yuzasida Nb atomlarining bir tekis yadrolanishini ko'rsatadi. Cho'ktirish jarayoni DC va RF purkash rejimlaridan foydalangan holda 2, 5 va 8 daqiqa davomida amalga oshirildi. Cho'ktirish tezligi DC rejimida taxminan 7 $\text{\AA/s}$ va RF rejimida 8 $\text{\AA/s}$ ni tashkil etdi. 2 daqiqalik cho'ktirish vaqtida Nb qatlami taglik yuzasini to'liq qoplamadi, natijada amorfga o'xshash morfologiyaga ega qisman uzluksiz plyonka hosil bo'ldi. Cho'ktirish vaqtini 5 daqiqagacha oshirish uzluksiz va bir xil plyonka hosil bo'lishiga olib keldi. Keyingi cho'ktirish natijasida zich polikristalli Nb qatlami o'sdi.





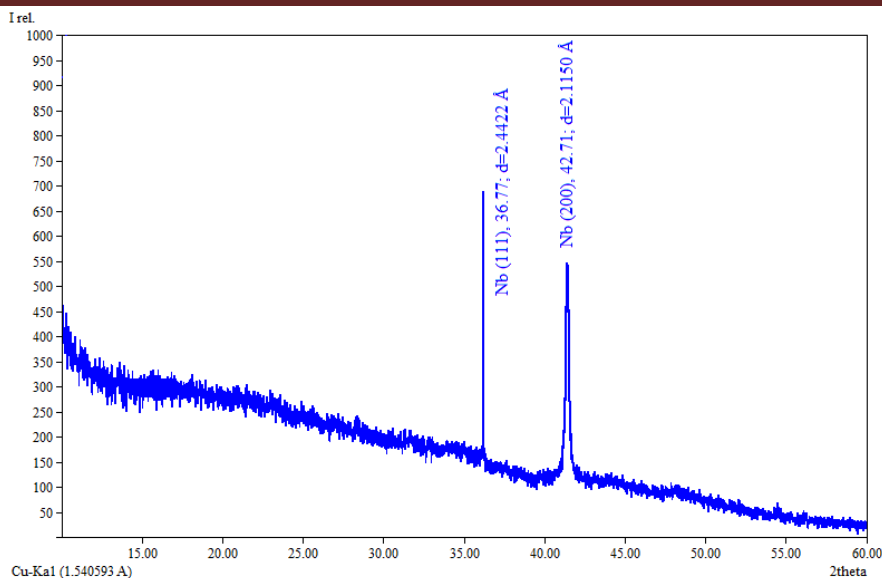
1-rasm. a) Magnetron purkash orqali Si taglikiga qo'yilgan Nb yupqa plyonkasining SEM sirt morfologiyasi. b) Nb yupqa plyonkasining qalinligini (~240 nm) ko'rsatuvchi ko'ndalang kesimli SEM tasviri. c) Nb va taglik elementlarining mavjudligini tasdiqlovchi Nb yupqa plyonkasining EDS spektri. d) Nb yupqa plyonka yuzasining mahalliy EDS tahlili uchun ishlatiladigan SEM tasviri.

Nb plyonkasining qalinligi ko'ndalang kesimli SEM tasviridan aniqlandi (1a-rasm). 1b-rasmda ko'rsatilganidek, 5 daqiqa davomida qo'yilgan namuna uchun plyonka qalinligi taxminan 0,24 mkm (240 nm) ni tashkil qiladi. Nb plyonkasi va Si tagliki orasidagi interfeys aniq ko'rinadi, bu yaxshi yopishish va plyonkaning bir tekis o'sishini ko'rsatadi. O'lchangan qalinlik kutilgan cho'kish tezligiga mos keladi, bu cho'kish vaqtining oshishi plyonka qalinligining mutanosib oshishiga olib kelishini tasdiqlaydi. Nb yupqa plyonkalarining elementar tarkibi energiya dispersli rentgen spektroskopiyasi (EDS) yordamida tahlil qilindi. EDS spektri Niobiy (Nb) ga mos keladigan kuchli xarakterli cho'qqini ko'rsatadi, bu esa Nb ning taglik yuzasida muvaffaqiyatli cho'kishini tasdiqlaydi. Nb cho'qqisidan tashqari, taglikdan kremniy (Si) ga mos keladigan signallar va kichik kislorod (O) signallari ham kuzatiladi. Kislorod signali cho'kish kamerasida ozgina sirt oksidlanishi yoki qoldiq kisloroddan kelib chiqishi mumkin. Nb cho'qqisining ustunligi cho'ktirilgan plyonka asosan niobiydan iborat ekanligini ko'rsatadi. EDS natijalari yuqori elementar tozalikka ega Nb yupqa plyonkalarining hosil bo'lishini tasdiqlaydi va rentgen o'lchovlaridan olingan strukturaviy ma'lumotlarga mos keladi.

3.4. Nb yupqa plyonkalarining rentgen tahlili

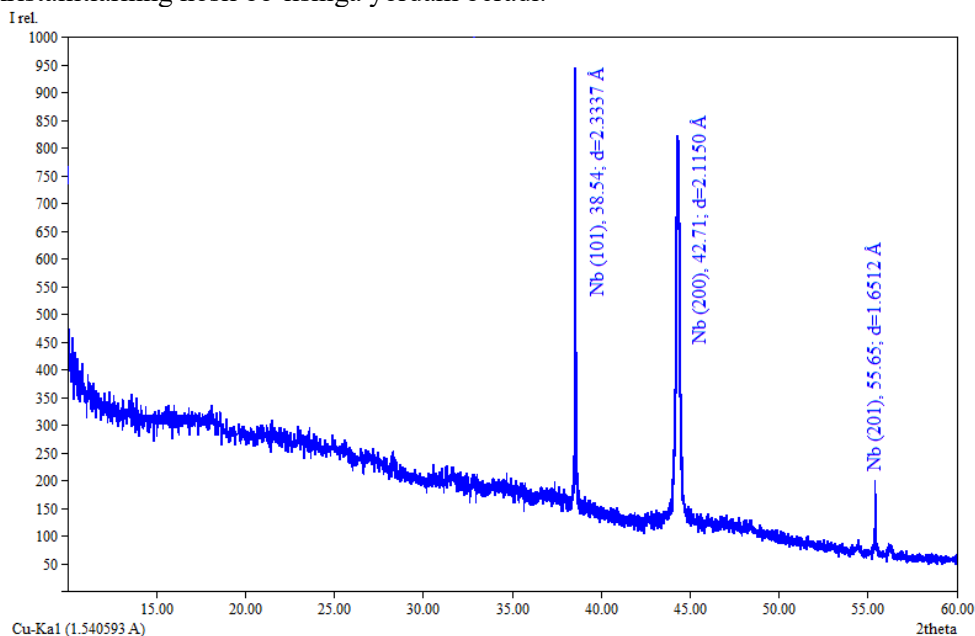
DC va RF magnetron purkash orqali cho'ktirilgan Nb yupqa plyonkalarining kristall tuzilishi Cu K α nurlanishi ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) bilan rentgen difraksiyasi (XRD) yordamida o'rganildi.

2-rasmda DC magnetron purkash orqali cho'ktirilgan Nb yupqa plyonkasining XRD naqshi ko'rsatilgan. $2\theta = 36,7^\circ$ va $42,7^\circ$ da kuzatilgan ikkita difraksiya cho'qqisi mos ravishda tanaga yo'naltirilgan kubik (BCC) niobiyning (110) va (200) kristallografik tekisliklariga mos keladi. Hisoblangan tekisliklararo oraliqlar $d_{110} = 2,442 \text{ \AA}$ va $d_{200} = 2,115 \text{ \AA}$ bo'lib, ular metall Nb uchun standart difraksiya ma'lumotlari bilan yaxshi mos keladi. (110) cho'qqining intensivligi (200) aks ettirish intensivligidan sezilarli darajada yuqori, bu (110) yo'nalish bo'ylab kuchli imtiyozli yo'nalishni ko'rsatadi. Bunday tekstura magnetron purkash orqali cho'ktirilgan Nb yupqa plyonkalari uchun odatiy holdir, chunki (110) tekislik BCC strukturasidagi eng past sirt energiyasi tekisligini ifodalaydi. Qo'shimcha difraksiya cho'qqilarining yo'qligi plyonkaning yuqori teksturali polikristalli tuzilishga ega ekanligini ko'rsatadi, unda ko'pgina kristallitlar (110) yo'nalish bo'ylab yo'naltirilgan. Nisbatan keng difraksiya cho'qqilari nanoskalaviy kristallit o'lchamlarini va purkash jarayonida hosil bo'lishi mumkin bo'lgan panjara buzilishlarini ko'rsatadi.



2-rasm. DC magnetron purkash orqali qo'yilgan Nb yupqa plyonkasining rentgen tasviri, BCC Nb fazasining kuchli (110) afzal yo'nalishini ko'rsatadi

3-rasmda RF magnetron purkash orqali qo'yilgan Nb yupqa plyonkasining rentgen tasviri ko'rsatilgan. DC rejimda hosil qilingan plyonkadan farqli o'laroq, RF qo'yilgan namunada BCC Nb ning (101), (200) va (201) kristallografik tekisliklariga mos keladigan $2\theta = 38,5^\circ$, $42,7^\circ$ va $55,6^\circ$ da joylashgan bir nechta difraktsiya cho'qqilari ko'rsatilgan. Hisoblangan tekisliklararo oraliqlar mos ravishda $2,333 \text{ \AA}$, $2,115 \text{ \AA}$ va $1,651 \text{ \AA}$ ni tashkil qiladi. Bir nechta difraktsiya cho'qqilarining mavjudligi RF rejimda hosil qilingan plyonkaning bir nechta kristallografik yo'nalishlarga ega yaxshi rivojlangan polikristal tuzilishga ega ekanligini ko'rsatadi. Bu xatti-harakatni yuqori plazma zichligi va RF purkash paytida ion bombardimonining kuchayishi bilan bog'lash mumkin, bu esa atomning harakatchanligini oshiradi va turli yo'nalishdagi kristallitlarning hosil bo'lishiga yordam beradi.



3-rasm. RF magnetronli purkash orqali qo'yilgan Nb yupqa plyonkasining rentgen tasviri, bu bir nechta kristallografik yo'nalishlarga ega polikristalli tuzilishni ko'rsatadi

DC bilan qo'yilgan plyonka bilan taqqoslaganda, RF bilan o'stirilgan namunada kristallik yaxshilangan va tekstura anizotropiyasi pasaygan, bu plyonka o'sishi paytida mikrostrukturaning bir xilroq evolyutsiyasini ko'rsatadi. Difraksiya naqshlarini taqqoslash shuni aniq ko'rsatadiki, DC purkash rejimi kuchli (110) tekstura hosil bo'lishiga yordam beradi, RF purkash rejimi esa tasodifiy yo'naltirilgan

polikristalli tuzilishga olib keladi. RF purkash paytida ion energiyasi va plazma zichligining ortishi adatomlarning sirt diffuziyasini kuchaytiradi, natijada kristallik yaxshilanadi va qo'shimcha difraktsiya cho'qqilari paydo bo'ladi. Nb plyonkalarining panjara parametri kubik panjara munosabati bilan birga Bragg qonuni yordamida hisoblab chiqilgan. RF bilan cho'ktirilgan plyonka uchun hisoblangan panjara parametri $\approx 3.30 \text{ \AA}$ ni tashkil etadi, bu niobiyning asosiy qiymatiga ($3.30 \text{ \AA}$) juda yaqin [8]. Bu natija minimal panjara buzilishi bilan yaxshi tartiblangan kristalli strukturaning shakllanishini tasdiqlaydi. Aksincha, DC bilan cho'ktirilgan plyonka hisoblangan panjara parametrda biroz kattaroq og'ishlarni ko'rsatadi, bu esa purkash jarayonida hosil bo'lgan qoldiq kuchlanishlar va panjara buzilishlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin (2-jadval).

1-jadval. XRD tahlili va adabiyot ma'lumotlari bilan taqqoslash natijasida olingan Nb yupqa plyonkalarining strukturaviy parametrlari

Parametr	DC (ushbu ishda)	RF (ushbu ishda)	Adabiyot
Kristall struktura	BCC - Nb	BCC - Nb	BCC Nb tuzilishi keng tarqalgan [14, 15]
Panjara parametri (a)	(110) $3.454 \text{ \AA}$	(101) $3.299 \text{ \AA}$	$3.30 \text{ \AA}$ (bulk Nb)[14]
Panjara parametri (a)	(200) $4.230 \text{ \AA}$	(200) $4.230 \text{ \AA}$	(200) chanlatilgan Niobiy uchun xos refleksiya [21]
Panjara parametri (a)	-	(201) $3.69 \text{ \AA}$	Bir nechta yo'nalishlar haqida xabar berilgan [8]
Kristallit o'chami	18–25 nm	28–35 nm	20–30 nm [2, 24]
Mikrodeformatsiya (ϵ)	$(2-3) \times 10^{-3}$	$(1-2) \times 10^{-3}$	10^{-3} order [24]
Dislokatsiya zichligi (δ)	2.5×10^{15}	1.0×10^{15}	$10^{14}-10^{15} \text{ m}^{-2}$ [2, 24]

O'rtacha kristallit hajmi Scherrer tenglamasi yordamida hisoblab chiqilgan. DC bilan cho'ktirilgan plyonka 18–25 nm oralig'ida kristallit o'lchamlarini ko'rsatadi, RF bilan cho'ktirilgan plyonka esa 28–35 nm kattaroq kristallitlarni ko'rsatadi. RF purkashda kristallit hajmining oshishi adatom harakatchanligining oshishi va plazmadagi ionlarning kuchliroq bombardimon qilinishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin, bu esa kristall o'sishini jadallashtiradi va kristallikni yaxshilaydi. Mikrodeformatsiya va dislokatsiya zichligi kabi qo'shimcha strukturaviy parametrlar ham baholandi. Hisoblangan mikrodeformatsiya qiymatlari DC plyonka uchun $(2-3) \times 10^{-3}$ va RF plyonka uchun $(1-2) \times 10^{-3}$ tartibida bo'lib, bu RF bilan cho'ktirilgan plyonkada panjara buzilishining pastroq ekanligini ko'rsatadi. Xuddi shunday, dislokatsiya zichligi DC plyonka uchun taxminan $2.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ dan RF plyonka uchun $1.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ gacha kamayadi, bu esa kristall nuqsonlarining sezilarli darajada kamayishini tasdiqlaydi. Olingan kristallit o'lchamlari DC bilan cho'ktirilgan plyonkalar uchun 18–25 nm va RF bilan cho'ktirilgan plyonkalar uchun 28–35 nm magnitron bilan purkalgan Nb yupqa plyonkalari uchun ilgari xabar qilingan qiymatlarga o'xshash. Masalan, Nivedita va boshqalar [8] nanokristalli Nb plyonkalari uchun cho'ktirish sharoitlariga qarab 20–40 nm oralig'ida kristallit o'lchamlarini xabar qilishdi. Xuddi shunday, Rao va boshqalar [24] purkash parametrlari Nb yupqa plyonkalarining kristallografik tuzilishi va don hajmiga kuchli ta'sir qilishini ko'rsatdilar. Ushbu tadqiqotda olingan natijalar ushbu hisobotlarga yaxshi mos keladi va purkash rejimi Nb qoplamalarining mikrotuzilmasini boshqarishda muhim rol o'ynashini tasdiqlaydi.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, cho'ktirish rejimi Nb yupqa plyonkalarining strukturaviy xususiyatlariga kuchli ta'sir qiladi. DC purkash rejimi kuchli (110) afzal yo'nalishni shakllantirishga yordam beradi, RF purkash esa kristallikning yaxshilanishiga, kristallit o'lchamlarining kattalashishiga va panjara nuqsonlarining kamayishiga olib keladi. Bu yaxshilanishlar asosan yuqori plazma zichligi va RF purkash paytida ion yordamida sirt diffuziyasining kuchayishi bilan bog'liq.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda magnetron changlatish qurilmasining DC va RF rejimlarida turli xil vaqt davomida Nb yupqa plyonkalarini hosil qilindi va ularni changlatish rejimlariga bog'liq sirt morfologiyasi hamda Rentgen faza tahlillarini o'rganildi. DC rejimda hosil qilingan plyonkadan farqli o'laroq, RF rejimda hosil qilingan namunada BCC Nb ning (101), (200) va (201) kristallografik tekisliklariga mos keladigan $2\theta = 38.5^\circ$, 42.7° va 55.6° da joylashgan bir nechta difraktsiya cho'qqilari ko'rsatilgan. Hisoblangan tekisliklararo oraliqlar mos ravishda $2.333 \text{ \AA}$, $2.115 \text{ \AA}$ va $1.651 \text{ \AA}$ ni tashkil qildi. Bir nechta difraktsiya cho'qqilarining mavjudligi RF qo'yilgan plyonkaning bir nechta kristallografik yo'nalishlarga ega yaxshi rivojlangan polikristal tuzilishga ega ekanligini ko'rsatdi. Nb yupqa plyonkalarining strukturaviy, morfologik xossalari skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), miqdoriy tahlili EDS, hamda plyonkalarining strukturaviy,

morfoloqik va kompozitsion xususiyatlari rentgen difraktsiyasi (XRD) yordamida har tomonlama tadqiq etildi. Hisoblangan mikrodeformatsiya qiymatlari DC plyonka uchun $(2-3) \times 10^{-3}$ va RF plyonka uchun $(1-2) \times 10^{-3}$ tartibida bo'lib, bu RF bilan cho'ktirilgan plyonkada panjara buzilishining pastroq ekanligini ko'rsatadi. Xuddi shunday, dislokatsiya zichligi DC plyonka uchun taxminan $2,5 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ dan RF plyonka uchun $1,0 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ gacha kamayadi, bu esa kristall nuqsonlarining sezilarli darajada kamayishini tasdiqlaydi.

Olingan natijalarga ko'ra kristallit o'lchami DC rejimda purkalgan plyonkalar uchun taxminan 18-25 nm va RF rejimda purkalgan plyonkalar uchun 28-35 nm oralig'ida bo'lgan. Olingan natijalar ushbu tadqiqotda tayyorlangan Nb yupqa plyonkalari yuqori strukturaviy sifatga ega ekanini tasdiqlaydi hamda ularning fotokatalitik qurilmalarda istiqbolli material sifatida qo'llanilishi mumkinligini ko'rsatadi.

ADABIYOTLAR:

1. A. Sáenz-Trevizo, A.M. Hodge, *Nanotechnology*. 31, 292002 (2020)
2. P.N. Rao, R.K. Gupta, K. Sarvanan, A. Bose, S.C. Joshi, T. Gan guli, S.K. Rai, *Surf. Coat. Technol.* 334, 536–542 (2018)
3. H.M. Chen, R.-S. Liu, *J. Phys. Chem. C* 115, 3513–3527 (2011)
4. S.T. Kowel, R. Selfridge, C. eldering, N. Matloff, P. Stroeve, B.G. Higgins, M.P. Srinivasan, L.B. Coleman, *Thin solid films* 152, 377–403 (1987)
5. A.K. Bhattu, N. Makeswaran, C.V. Ramana, *J. Mater. Sci. Technol.* 35, 2734–2741 (2019)
6. S. Bose, P. Raychaudhuri, R. Banerjee, P. Ayyub, *Phys. Rev. B* 74, 224502 (2006)
7. C.V. Ramana, N. Makeswaran, V. Zade, D. Das, S. Tan, S. Xu, I.J. Beyerlein, *J. Phys. chem. C* 126, 2098–2107 (2022)
8. Nivedita L.R., Haubert A., Battu A.K., Ramana C.V. Correlation between crystal structure, surface/interface microstructure, and electrical properties of nanocrystalline niobium thin films. *Nanomaterials*, 2020, 10(7), 1287. <https://doi.org/10.3390/nano10071287>
9. X. Liu, X. Liu, H. Wang, L. Chen, Z. Wang, *Phys. C: Superconductivity* 515, 36 (2015)
10. V. Arbert-Engels, C. Benvenuti, S. Calatroni, P. Darriulat, M.A. Peck, A.-M. Valente, C. Van't Hof, *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A* 463, 1–8 (2001)
11. C. James, M. Krishnan, B. Bures, T. Tajima, L. Civale, R. Edwards, J. Spradlin, H. Inoue, *IEEE Transcat. Appl. Supercond* 23, 3500205 (2013)
12. M. Krishnan, E. Valderrama, B. Bures, K. Wilson-Elliott, X. Zhao, L. Phillips, A.-M. Valente-Feliciano, J. Spradlin, C. Reece, K. Seo, *Supercond Sci. Technol.* 24, 115002 (2011)
13. J.A. Thornton, D.W. Hoffman, *Thin Solid Films* 171, 5–31 (1989)
14. C.T. WU, *Thin Solid Films* 64, 103–110 (1979)
15. T.C. de Freitas, J.L. Gonzalez, V.P. Nascimento, E.C. Passamani, *Thin Solid Films* 611, 33–38 (2016)
16. D. Tonini, C. Greggio, G. Keppel, F. Laviano, M. Musiani, G. Torzo, V. Palmieri, 11th workshop on RF superconductivity, Lübeck/Travemünder, 1 (2003).
17. S. Cattarin, M. Musiani, V. Palmieri, D. Tonini, *Electrochim. Acta* 51, 1745–1751 (2006)
18. Emeka N.C., Imoisili P.E., Jen T.C. Preparation and characterization of Nb_xO_y thin films: a review. *Coatings*, 2020, 10(12), 1246. <https://doi.org/10.3390/coatings10121246>
19. Ramana C.V., Makeswaran N., Zade V., Das D., Tan S., Xu S., Beyerlein I.J. Fabrication and characterization of high-quality epitaxial nanocolumnar niobium films with abrupt interfaces on YSZ(001). *Journal of Physical Chemistry C*, 2022, 126, 2098–2107. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c08738>
20. Skliarova H., Renzelli M., Azzolini O., de Felicis D., Bemporad E., Johnson R.R., Palmieri V. Niobium–niobium oxide multilayer coatings for corrosion protection of proton-irradiated liquid water targets for production. *Thin Solid Films*, 2015, 591, 316–322.
21. Dovranov K.T., Imanova G.T., Loboda V.V., Normuradov M.T., Bekpulatov I.R. Formation of CrSi_2 film and measurement of optical band gap energy. *UNEC Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2024, 4(2), 37–46. <https://doi.org/10.61640/ujeas.2024.1204>
22. Dovranov K.T., Abrayeva S.T., Yorqulov R.M., Mustafoeva N.M., Buzrukov T.O., Jurayeva Sh.A., Aminov A.A. Formation and morphology of Cu nanofilms using DC and RF modes of a magnetron sputtering device. *Ukrainian Journal of Physics*, 2026, 71(1), 65. <https://doi.org/10.15407/ujpe71.1.65>

23. Dovranov K., Normuradov M., Davranov X., Husanov A., Shodiyev G., Ruziyeva G.T., Karimov E., Yorqulov R. Formation of $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4/\text{Si}$ nanophase films on silicon surfaces. *East European Journal of Physics*, 2026, 1, 326. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2026-1-38>
24. Rao P.N., Swami M.K., Ghosh A., Jangir R., Rai S.K. Influence of deposition pressure on microstructure, mechanical and electrical properties of niobium thin films. *Thin Solid Films*, 2024, 805, 140503. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140503>

GRANAT TIPIDAGI KRISTALLNING MAGNITOOPTIK XOSSALARI

Bobomurodov Sardor Sheraliyevich,

Buxoro davlat universiteti

sheraliyevic1106@gmail.com**Nasirova Nargiza Gayratovna,**

Buxoro davlat universiteti tayanch doktoranti

n.g.nasirova@buxdu.uz**Fayziyev Shaxobiddin Shavkatovich,**

Buxoro davlat universiteti Fizika kafedrası dotsenti

s.s.fayziyev@buxdu.uz

Annotatsiya. Mazkur ishda $R_3Fe_5O_{12}$ ($R = Pr-Lu$) tipidagi nodir yer elementli ferrit granatlarning kristall tuzilishi, termodinamik barqarorligi va magnit xossalari zichlik funksionali nazariyasi (DFT) asosida o'rganildi. Hisoblash natijalari barcha birikmalar kubik (Ia3d) kristall strukturasiga ega ekanligini va panjara parametrlari lantanid siqilishi natijasida kamayishini ko'rsatdi. Shakllanish energiyasining manfiy qiymatlari barcha tizimlarning termodinamik barqarorligini tasdiqladi. Magnit tahlil ferrimagnetik tartiblanishni aniqladi, bunda asosiy magnit moment Fe atomlariga tegishli ekanligi aniqlandi. Ayrim birikmalarda (Eu va Gd) anomal magnit xatti-harakatlar kuzatildi. Shuningdek, zichlik qiymatlarining ortishi atom massasi va panjara zichlashuvi bilan bog'liqligi aniqlandi. Olingan natijalar ferrit granatlarning magnitooptik qurilmalarda qo'llanilishi uchun muhim ilmiy asos yaratadi.

Kalit so'zlar: ferrit granat, DFT, nodir yer elementlari, magnit xossalar, ferrimagnetizm, kristall struktura, termodinamik barqarorlik, zichlik, magnitooptik materiallar

МАГНИТОПТИЧНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ТИПА ГРАНТА

Аннотация. В данной работе исследованы кристаллическая структура, термодинамическая стабильность и магнитные свойства феррит-гранатов типа $R_3Fe_5O_{12}$ ($R = Pr-Lu$) с использованием теории функционала плотности (DFT). Результаты расчетов показали, что все соединения обладают кубической кристаллической структурой (Ia3d), а параметры решетки уменьшаются вследствие лантаноидного сжатия. Отрицательные значения энергии образования подтверждают термодинамическую стабильность всех систем. Магнитный анализ выявил ферримagnetное упорядочение, при котором основной вклад в магнитный момент вносят атомы Fe. Для некоторых соединений (Eu и Gd) наблюдаются аномальные магнитные свойства. Также установлено, что увеличение плотности связано с ростом атомной массы и уплотнением кристаллической решетки. Полученные результаты представляют интерес для применения феррит-гранатов в магнитооптических устройствах.

Ключевые слова: феррит-гранаты, DFT, редкоземельные элементы, магнитные свойства, ферримagnetизм, кристаллическая структура, термодинамическая стабильность, плотность, магнитооптика

MAGNETOPTIC PROPERTIES OF GRANT-TYPE CRYSTALS

Abstract. In this study, the crystal structure, thermodynamic stability, and magnetic properties of rare-earth iron garnets $R_3Fe_5O_{12}$ ($R = Pr-Lu$) were investigated using density functional theory (DFT). The results show that all compounds possess a cubic crystal structure (Ia3d), and the lattice parameters decrease due to lanthanide contraction. The negative formation energies confirm the thermodynamic stability of all systems. Magnetic analysis reveals ferrimagnetic ordering, where Fe atoms provide the dominant contribution to the total magnetic moment. Anomalous magnetic behavior is observed in some compounds (Eu and Gd). Additionally, the increase in density is associated with increasing atomic mass and lattice compression. These findings provide a theoretical basis for the application of ferrite garnets in magneto-optical devices.

Key words: ferrite garnet, DFT, rare-earth elements, magnetic properties, ferrimagnetism, crystal structure, thermodynamic stability, density, magneto-optical materials

Kirish. Noyob magnit va optik xususiyatlari tufayli ferrit granatalari mikroto'liqlinli elektronika va magnit-optik qurilmalarda keng qo'llaniladi [1–3]. Ular shuningdek, ultra yuqori tezlikdagi ma'lumotlarni yozib olish va qayta ishlash qurilmalari uchun ham qiziqish uyg'otadi [4,5]. Ferrit granatalarining o'ziga xos xususiyati ularning tarkibini keng diapazonda o'zgartirish va turli magnit va optik xususiyatlarga ega qattiq eritmalar ishlab chiqarish qobiliyatidir [6–8].

Ferrit-granatlar noyob magnitooptik xossalari tufayli katta ilmiy va amaliy ahamiyatga ega materiallar sinfini tashkil etadi [9]. Ushbu birikmalar, ayniqsa ittrium temir granati, yuqori magnit tartiblash, keng polosali optik shaffoflik va o'ta past magnit so'nish xususiyatlariga ega bo'lib, ularni fotonik qurilmalar va yuqori chastotali elektronkada qo'llash uchun istiqbolli qiladi [10]. Tarixiy jihatdan, ferrimagnitlardagi magnitooptik hodisalarni o'rganish granat tuzilishiga ega kristallar bilan boshlangan bo'lib, ittrium va nodir yer ferrit-granatlarining umumiy formulasi $R_3Fe_5O_{12}$ hisoblanadi. Ushbu materiallar o'ta yuqori chastotalar texnikasida samarali qo'llash uchun muhim ahamiyatga ega bo'lgan juda tor ferromagnit rezonans yutilish chizig'iga ega [11]. Ushbu xususiyatlar, shuningdek, yuqori solishtirma qarshilik va sezilarli magnit moment, ularni zamonaviy magnitooptik komponentlar va yuqori chastotali ilovalarda qimmatli qiladi. Xususan, ittrium temir granati ($Y_3Fe_5O_{12}$) magnit materiallar orasida o'zining noyob xususiyatlari, jumladan tor ferromagnit rezonans chizig'i va yuqori solishtirma qarshiligi bilan ajralib turadi. Biroq, uning magnitooptik qurilmalarda qo'llanilishini cheklaydigan asosiy omil ko'rinadigan va infraqizil diapazonlardagi Faradey aylanishining nisbatan kichik qiymatidir. Bu cheklovga qaramay, nodir-yer elementlari bilan legirlangan ittrium temir granatlari magnitooptik javoblarning sezilarli darajada ortishi tufayli fotonika sohasida yuqori baholanadi. Misol uchun, $Y_3Fe_5O_{12}$ yttrium temir granatida Faradey aylanishining ahamiyatsizligi uning magnitooptik qurilmalarda qo'llanilishini cheklaydi, ammo vizual va infraqizil spektr diapazonlarida bisumut bilan almashtirish Faradey aylanishini sezilarli darajada oshiradi. Shu sababli, vismut o'rnini bosgan ittriy temir granat tarkibidagi magnitooptik hodisalarni o'rganish, ayniqsa yuqori zichlikdagi ma'lumotlarni saqlash texnologiyalari uchun, muhim amaliy ahamiyatga ega [12]. Ushbu tadqiqotda, biz ferrit-granat tipidagi kristallar, xususan, ittriy temir granatining magnitooptik xossalari, shu jumladan nodir yer metallarining qo'shilishi bilan bog'liq bo'lgan gyotropik javobga qo'shgan hissalarini chuqur o'rganamiz. Elektron o'tishlar va Fe^{2+} ionlarining d-qobiqlari bilan bog'liq bo'lgan jarayonlar hamda Fe-O-Fe bog'lanishidagi zaryad ko'chirish effektlari ferrit-granatlarining magnitooptik faolligini belgilovchi asosiy mexanizmlar hisoblanadi. Shu bilan birga, ittrium temir granati $Y_3Fe_5O_{12}$ kabi materiallar, o'zining tor ferromagnit rezonans chizig'i, yuqori magnit momenti va yuqori solishtirma qarshiligi bilan, magnitooptik qurilmalarda qo'llanilishi ko'rinadigan va infraqizil sohalaridagi Faradeyaylanishining pastligi sababli cheklanadi.

Tadqiqot metodologiyasi. Nazariy hisoblashlar zichlik funksionali nazariyasi (Density Functional Theory — DFT) doirasida amalga oshirildi. Boshlang'ich kristallografik ma'lumotlar The Materials Project ma'lumotlar bazasidan olindi. Strukturaviy optimallashtirish jarayonida panjara parametrlari (a, b, c) hamda atom koordinatalari to'liq relaksatsiya qilinib, tizimning energetik minimum holati aniqlandi. Hisoblashlar spin-polarizatsiyalangan holda bajarilib, magnit konfiguratsiyalar va lokal magnit momentlar qiymatlari aniqlangan. Vizualizatsiya va kristall strukturalarni tahlil qilish VESTA dasturi yordamida amalga oshirildi.

Termodinamik barqarorlik qiymatiga qarab, modda barqarorligi haqida tasavvurga ega bo'lamiz. Agar qiymat 0eV/atom bo'lsa, modda to'liq barqaror hisoblanadi. Agar qiymat 0eV/atom yaqin bo'lsa, modda metabarqaror lekin mavjud bo'lishi mumkin bo'ladi. Agar qiymat 0eV/atom dan katta bo'lsa, modda boshqa fazalarda parchalanadi. Shakllanish energiyasining manfiy qiymati fazaning termodinamik barqarorligini bildiradi. Magnit moment qiymatlari formulaviy birlikka ($\mu_B/f.u.$) nisbatan hisoblandi. $\mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T}$

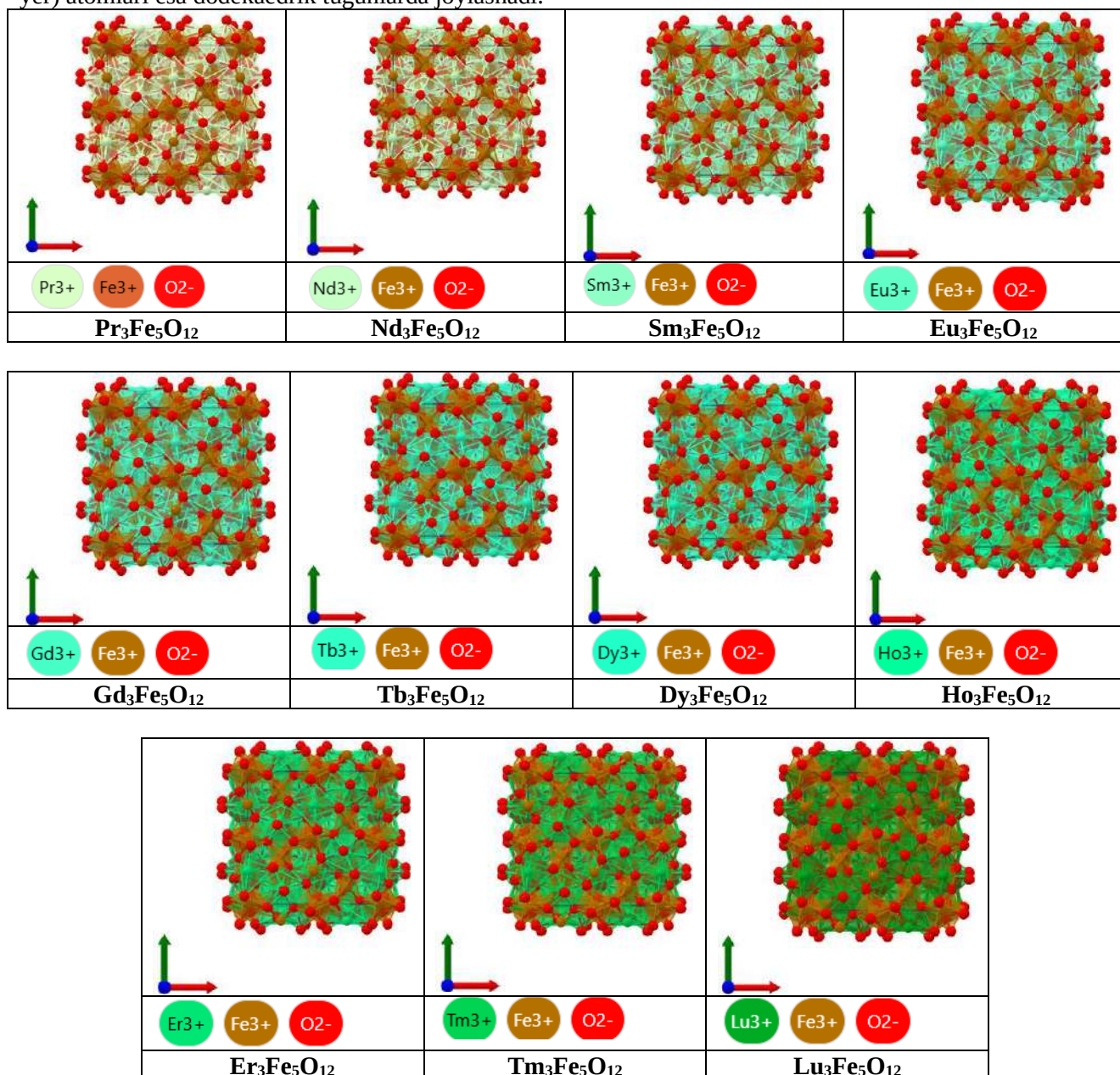
qiymat birligiga to'g'ri keladi.

Elementlarning asosiy fizik-kimyoviy parametrlari (atom massasi, zichligi, erish va qaynash temperaturasi) modellashtrish jarayonida materialning fazaviy barqarorligini tahlil qilishda qo'shimcha omil sifatida inobatga olindi.

Natijalar va muhokamalar. Nazariy hisoblashlar natijasida olingan optimallashtirilgan kristall tuzilmalar 1-rasmda keltirilgan. Strukturaviy modellashtrish Materials Project muhitida amalga oshirildi va natijalar VESTA dasturi yordamida vizualizatsiya qilindi. Hisoblash jarayonida panjara parametrlari energetik jihatdan barqaror holatga keltirildi.

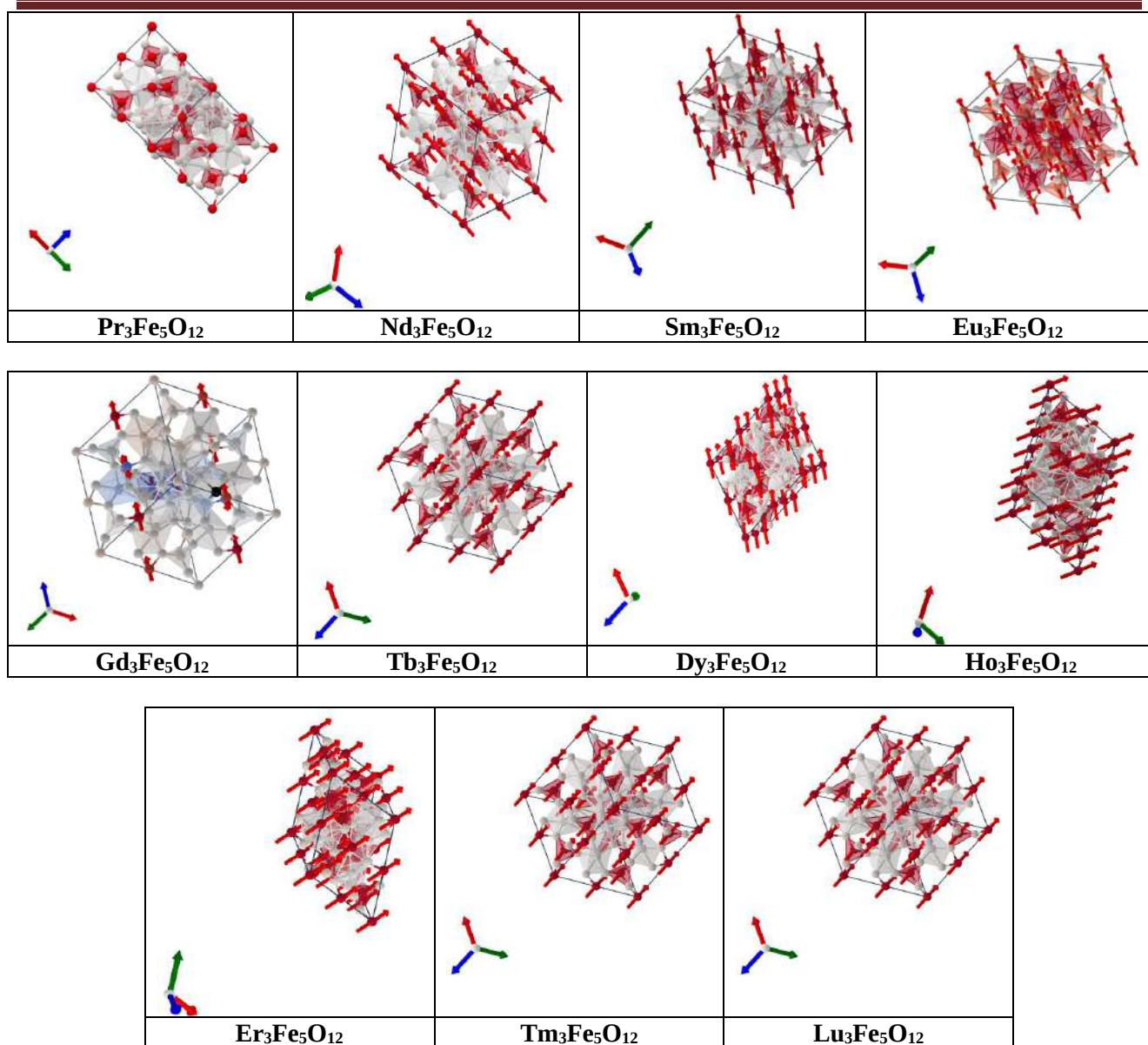
1-rasmda nodir yer elementlari (Pr–Lu) asosidagi ferrit granat birikmalarining ($R_3Fe_5O_{12}$) optimallashtirilgan kristall tuzilmalari keltirilgan. Barcha birikmalar kubik simmetriyaga ega bo'lib, fazoviy

guruhi Ia3d ga mos keladi. Strukturada Fe atomlari oktaedrik va tetraedrik pozitsiyalarni egallaydi, R (nodir yer) atomlari esa dodekaedrik tugunlarda joylashadi.



1-rasm. Nodir yer elementli ferrit granat birikmalarining optimallashtirilgan kristallografik tuzilmalari (VESTA va Materials Project dasturlari asosida vizualizatsiya qilingan)

Vizual tahlil shuni ko'rsatadiki, kristall panjara geometriyasi barcha elementlar uchun o'xshash saqlanadi, ya'ni izostrukturaviylik kuzatiladi. Biroq panjara o'lchamlari nodir yer elementining atom radiusiga bog'liq ravishda kamayadi. Bu holat lantanid siqilishi bilan izohlanadi va keyingi jadval natijalari bilan ham tasdiqlanadi.



2-rasm. Nodir yer elementli ferrit granat birikmalarining spin-polarizatsiyalangan magnet konfiguratsiyasi. Qizil strelkalar Gd atomlarining lokal magnet moment yo'nalishlarini ifodalaydi (Materials mProject va VESTA dasturlari asosida vizualizatsiya qilingan)

2-rasmda spin-polarizatsiyalangan hisoblashlar asosida olingan magnet momentlarning fazoviy yo'nalishi ko'rsatilgan. Qizil strelkalar lokal magnet momentlarning yo'nalishini ifodalaydi. Natijalar ferrimagnetik tartiblanishni aniq ko'rsatadi: Fe atomlarining turli kristall pozitsiyalarda joylashgan spinlari o'zaro antiparallel yo'nalgan. Nodir yer elementlari esa umumiy magnet momentga qo'shimcha hissa qo'shadi. Ayniqsa, ayrim elementlarda (masalan, Gd) magnet momentlarning kompensatsiyasi kuzatilib, umumiy magnetlanishning kamayishiga olib keladi.

1-jadval. Kristall panjara doimiyligi.

Qotishma	a (Å)	b (Å)	c (Å)	α	β	γ
Pr ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.81	12.81	12.81	90	90	90
Nd ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.78	12.78	12.78	90	90	90
Sm ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.69	12.69	12.69	90	90	90
Eu ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.72	12.72	12.72	90	90	90
Gd ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.63	12.63	12.63	90	90	90
Tb ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.57	12.57	12.57	90	90	90
Dy ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.54	12.54	12.54	90	90	90
Ho ₃ Fe ₅ O ₁₂	12.49	12.49	12.49	90	90	90

PHYSICS

Er₃Fe₅O₁₂	12.48	12.48	12.48	90	90	90
Tm₃Fe₅O₁₂	12.45	12.45	12.45	90	90	90
Lu₃Fe₅O₁₂	12.40	12.40	12.40	90	90	90

1-jadvalda barcha birikmalar uchun panjara parametrlari (a, b, c) va burchaklar keltirilgan. Natijalarga ko'ra:

- Barcha birikmalar uchun $a = b = c$ va $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, ya'ni kubik simmetriya tasdiqlanadi.
- Panjara parametri Pr₃Fe₅O₁₂ (12.81 Å) dan Lu₃Fe₅O₁₂ (12.40 Å) gacha kamayadi.

Bu tendensiya nodir yer elementlari atom radiusining kamayishi bilan bog'liq bo'lib, kristall panjaraning siqilishini ko'rsatadi. Ushbu natija DFT hisoblashlarning fizik jihatdan to'g'ri ekanligini tasdiqlaydi.

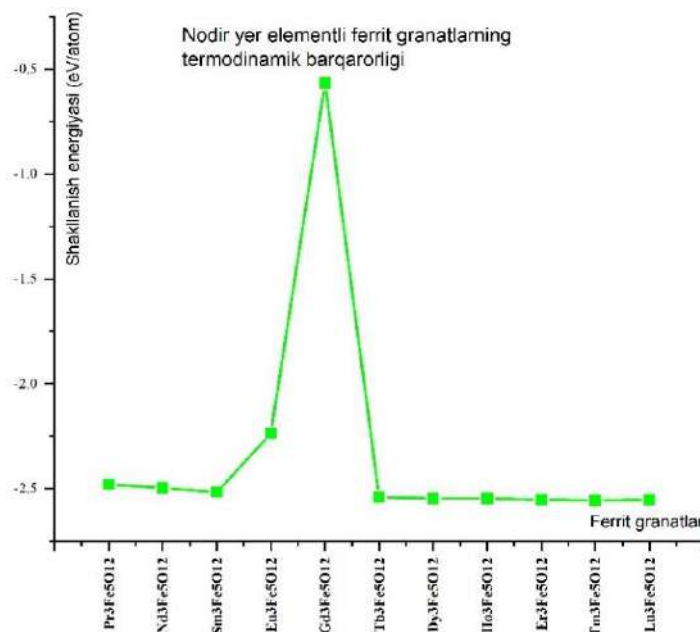
2-jadval. Simmetriya parametrlari.

Qotishma	Kristal tizimi	Panjara tizimi	Zal raqami	Xalqaro raqam	Belgi	Nuqta guruhi
Pr₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Nd₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Sm₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Eu₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Gd₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Tb₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Dy₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Ho₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Er₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Tm₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m
Lu₃Fe₅O₁₂	Kubik	Kubik	-I 4bd 2c 3	230	la3d	m3m

2-jadval natijalari barcha birikmalar bir xil kristall tizimga tegishli ekanligini ko'rsatadi:

- Kristall tizimi: kubik
- Fazoviy guruh: Ia3d
- Nuqta guruhi: m3m

Bu holat R elementining almashishi struktura turini o'zgartirmasligini, faqat panjara parametrlari va fizik xossalarga ta'sir qilishini ko'rsatadi.



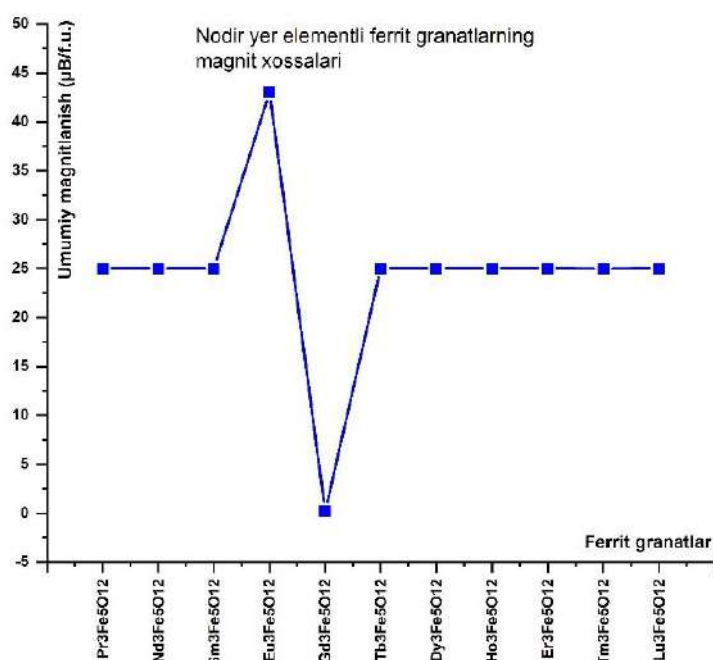
3-rasm. Nodir yer elementlari ferrit granatlarning termodinamik barqarorligi grafigi

3-jadvaldagi qiymatlarga asosan termodinamik barqarorlik grafigi (3-rasm)dan ko'rinadiki, barcha birikmalar uchun shakllanish energiyasi manfiy qiymatga ega bo'lib, bu ularning barqarorligini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, Gd₃Fe₅O₁₂ birikmasida energiyaning keskin oshishi (kamroq manfiy qiymat) kuzatilib, bu

uning boshqa birikmalarga nisbatan pastroq barqarorlikka ega ekanligini bildiradi. Qolgan birikmalarda esa energiya deyarli bir xil diapazonda saqlanib, tizimning umumiy barqarorligini ko'rsatadi.

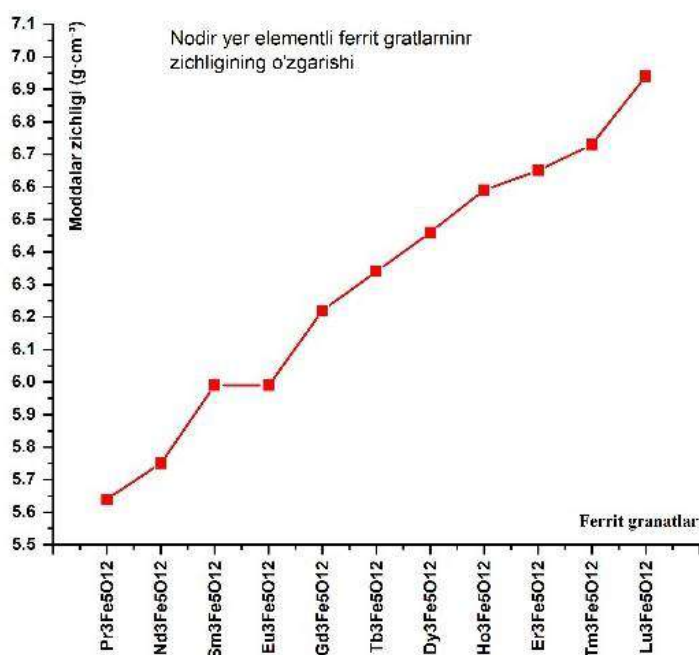
3-jadval

Qotishma	Termodinamik barqarorlik (eV/atom)	Zichligi ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Umumiy magnitlanish ($\mu\text{B}/\text{f.u.}$)
$\text{Pr}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.479	5.64	25.00
$\text{Nd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.497	5.75	25.00
$\text{Sm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.517	5.99	25.00
$\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.238	5.99	43.00
$\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-0.565	6.22	0.18
$\text{Tb}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.542	6.34	25.00
$\text{Dy}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.547	6.46	25.00
$\text{Ho}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.548	6.59	25.00
$\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.553	6.65	25.00
$\text{Tm}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.557	6.73	24.99
$\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	-2.553	6.94	25.00



4-rasm. Nodir yer elementli ferrit granatlarning magnit xossalari grafigi

4-rasmda keltirilgan magnit xossalar grafigi ferrimagnetik tizimga xos bo'lgan xatti-harakatni namoyon etadi (qiymatlar 3-jadvaldan olingan). Ko'pchilik birikmalar uchun umumiy magnit moment taxminan $25 \mu\text{B}/\text{f.u.}$ atrofida saqlanadi. Biroq $\text{Eu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ birikmasida magnit momentning keskin ortishi kuzatiladi, bu uning elektron konfiguratsiyasi va almashinish o'zaro ta'sirlarining o'ziga xosligi bilan izohlanadi. Aksincha, $\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ da magnit moment deyarli nolga teng bo'lib, bu spin kompensatsiyasi holatini ko'rsatadi.



5-rasm. Nodir yer elementli ferrit granatlarning zichliklari o'zgarishi grafigi

Zichlik grafigi esa nodir yer elementining atom raqami ortishi bilan zichlikning monoton ravishda oshib borishini ko'rsatadi. Bu holat atom massasi ortishi va kristall panjara parametrlarining kamayishi (panjaraning zichlashuvi) bilan bog'liq. Eng kichik zichlik $\text{Pr}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ uchun, eng katta zichlik esa $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ uchun kuzatiladi.

Umuman olganda, keltirilgan grafiklar nodir yer elementining turiga qarab ferrit granatlarning termodinamik, magnit va strukturaviy xossalari sezilarli darajada o'zgarishini yaqqol ko'rsatadi hamda ushbu materiallarning magnitooptik xossalarini boshqarishda muhim omil ekanligini tasdiqlaydi.

Xulosa. Ushbu ishda $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ($\text{R} = \text{Pr-Lu}$) tipidagi nodir yer elementli ferrit granatlarning kristall tuzilishi, termodinamik barqarorligi va magnit xossalari zichlik funksionali nazariyasi asosida tizimli ravishda o'rganildi. Hisoblash natijalari barcha birikmalar kubik ($\text{Ia}\bar{3}\text{d}$) kristall strukturasi ega ekanligini hamda panjara parametrlari nodir yer elementlari qatorida atom radiusining kamayishi hisobiga izchil qisqarishini ko'rsatdi. Shakllanish energiyasining manfiy qiymatlari barcha tizimlarning termodinamik barqarorligini tasdiqlab, og'ir nodir yer elementlari asosidagi birikmalar nisbatan barqarorroq ekanini ko'rsatdi. Magnit xossalar tahlili ferrimagnetik tartiblanish mavjudligini aniqladi, bunda asosiy magnit hissa Fe atomlariga tegishli bo'lib, ayrim elementlarda (xususan, Eu va Gd) elektron konfiguratsiya bilan bog'liq anomal holatlar kuzatildi. Bundan tashqari, zichlik qiymatlarining ortib borishi kristall panjaraning zichlashuvi bilan mos kelishi aniqlandi. Olingan natijalar nodir yer elementli ferrit granatlarning magnitooptik xossalarini boshqarish va ularni zamonaviy optoelektron hamda spintronika qurilmalarida qo'llash uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR:

1. A.K. Zvezdin, V.A. Kotov. *Modern magnetooptics and magneto-optical materials*. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia (1997). 381 p.
2. B.A. Бокков. *Физика магнетиков. Невский диалект, СПб* (2002). 271 с.
3. L. Bi, J. Hu, P. Jiang, H.S. Kim, D.H. Kim, M.C. Onbasli, G.F. Dionne, C.A. Ross. *Materials* 6, 5094 (2013).
4. M. Deb, M. Vomir, J.-L. Rehspringer, J.-Y. Bigot. *Appl. Phys. Lett.* 107, 252404 (2015).
5. A. Stupakiewicz, K. Szerenos, D. Afanasiev, A. Kirilyuk, A.V. Kimel. *Nature* 542, 71 (2017).
6. P. Hansen, P. Roschmann, W. Tolksdorf. *J. Appl. Phys.* 45, 2728 (1974).
7. L.E. Helseth, R.W. Hansen, E.I. Il'yashenko, M. Baziljevich, T.H. Johansen. *Phys. Rev. B* 64, 174406 (2001).
8. P. Roschmann, P. Hansen. *J. Appl. Phys.* 52, 6257 (1981).
9. Nakamura, Y., Chauhan, S. B. S., & Lim, P. B. (2024). *Magneto-Optical Properties and Applications of Magnetic Garnet*. *Photonics*, 11(10), 931. <https://doi.org/10.3390/photonics11100931>

10. Кудасов, Ю. Б., & Козабаранов, Р. В. (2019). Магнитная структура разбавленных ферритов-гранатов. *Физика Твёрдого Тела*, 61(9), 1640. <https://doi.org/10.21883/ftt.2019.09.48103.06n>
11. Кузнецов, Е. А., Ринкевич, А. Б., & Перов, Д. В. (2019). Резонансные изменения микроволнового коэффициента преломления в пластинах иттриевого феррита-граната. *Журнал Технической Физики*, 89(5), 679. <https://doi.org/10.21883/jtf.2019.05.47468.324-18>
12. Li, W.-K., & Guo, G. (2021). First-principles study on magneto-optical effects in the ferromagnetic semiconductors $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ and $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. *Physical Review B*, 103(1). <https://doi.org/10.1103/physrevb.103.014439>

HETERO -STRUCTURED SOLAR PHOTOCELLS

Matnazarov Anvar Rustamovich,
 Urgench Innovation University
Tashpulatova Dildora Khaydarkulovna,
 Jizzakh State Pedagogical University
Narkulov Saydulla Karomovich,
 Jizzakh Polytechnic Institute

Abstract. A comparative analysis of the prospects of creating ultra-thin, light and highly efficient solar cells based on AlGaAs/GaAs heterostructures has been provided. A micron - scale thinning of AlGaAs/GaAs heterostructures using efficient technological methods has been proposed, which has been shown to significantly increase the yield percentage of solar cells. As we know that the photocurrent flow in the element depends on constant temperature radiation. As the irradiance increases, the photocurrent and voltage increase. This leads to an increase in total power of the system. For the case heterostructure system, when the operating temperature increases, the current output increases, which affects the sharply decrease in power of the photocell. So, the solar cells based on heterostructures have very high efficiency and high radiation resistance.

Keywords: heterostructure, solar energy, alternative energy sources, electricity, photovoltaics, solar cell, monocrystalline and polycrystalline silicon, cascade elements, amorphous silicon, solar module.

GETEROSTRUKTURALI QUYOSH FOTOELEMENTLARI

Annotatsiya. AlGaAs/GaAs geterostrukturalari asosida o'ta yupqa, yengil va yuqori samaradorlikka ega quyosh elementlarini yaratish istiqbollari bo'yicha taqqoslama tahlil keltirilgan. Samarali texnologik usullar yordamida AlGaAs/GaAs geterostrukturalarini mikron darajasida yupqalashtirish taklif etilgan bo'lib, bu quyosh elementlarining chiqish samaradorligini sezilarli darajada oshirishi ko'rsatilgan. Ma'lumki, elementdagi fototok oqimi doimiy harorat va nurlanishga bog'liq. Nurlanish intensivligi ortishi bilan fototok va kuchlanish ham ortadi. Bu esa tizimning umumiy quvvatini oshishiga olib keladi. Geterostruktura tizimi holatida esa ishchi harorat ortganda chiqish toki ortadi, bu esa fotoelement quvvatining keskin kamayishiga ta'sir qiladi. Shunday qilib, geterostrukturalarga asoslangan quyosh elementlari juda yuqori samaradorlik va yuqori nurlanishga chidamlilikka ega.

Kalit so'zlar: geterostruktura, quyosh energiyasi, muqobil energiya manbalari, elektr energiyasi, fotovoltaika, quyosh elementi, monokristall va polikristall kremniy, kaskad elementlar, amorf kremniy, quyosh moduli.

ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

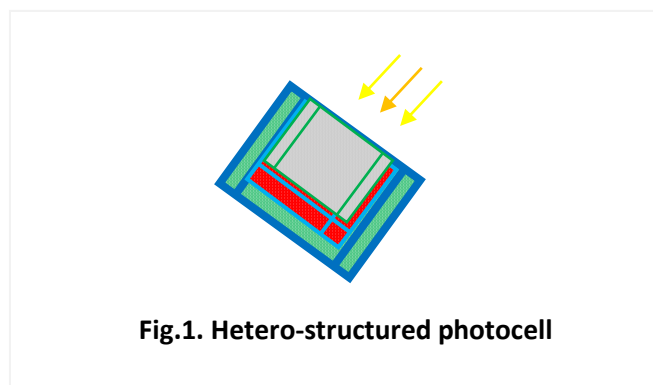
Аннотация. Представлен сравнительный анализ перспектив создания ультратонких, лёгких и высокоэффективных солнечных элементов на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs. Предложено уменьшение толщины гетероструктур AlGaAs/GaAs до микронного уровня с использованием эффективных технологических методов, что, как показано, значительно увеличивает выход солнечных элементов. Известно, что поток фототока в элементе зависит от постоянной температуры и излучения. С увеличением интенсивности излучения возрастают фототок и напряжение, что приводит к увеличению общей мощности системы. В случае гетероструктурной системы при повышении рабочей температуры увеличивается выходной ток, что приводит к резкому снижению мощности фотоэлемента. Таким образом, солнечные элементы на основе гетероструктур обладают очень высокой эффективностью и высокой радиационной стойкостью.

Ключевые слова: гетероструктура, солнечная энергия, альтернативные источники энергии, электричество, фотогальваника, солнечный элемент, монокристаллический и поликристаллический кремний, каскадные элементы, аморфный кремний, солнечный модуль.

Introduction. Currently, the need to increase the energy-mass characteristics of solar batteries is of urgent importance. The main ways to solve this problem are to increase the efficiency of solar cells based on

AlGaAs/GaAs compounds, which have the highest efficiency, and to reduce their size and weight. Achieving such efficiency requires new optimized photovoltaic system architectures and high-quality semiconductor materials. In the world, intensive research is being conducted to increase the efficiency of solar cells up to 35% in promising heterostructures by increasing the number of p-n junctions in semiconductors to four, five and even six. Currently, silicon is the main material for solar cells. The efficiency of silicon-based solar cells is 15-16% under direct irradiation in near-Earth space conditions. Solar cells based on heterostructures provide high efficiency and have high radiation resistance. An important advantage of heterophotoconverters is their ability to efficiently convert high-concentration solar radiation (up to 1000 - 2000 times), which opens up the prospect of significantly reducing the area and cost of solar cells (proportional to the concentration level) and, as a result, leads to a decrease in the price of "solar" electricity.

Solar cells based on GaAs heterostructures were presented for the first time by A.F. Ioffe and it was created at the Institute of Physics and Technology. The use of a wide - gap "window" made of a thin layer of AlGaAs solid solution, which is almost completely transparent to solar radiation, ensures the passivation of the surface of the photoactive region. Multilayer AlGaAs/GaAs heterostructures were created using low-temperature liquid-phase epitaxy [1-5], which ensured record efficiency for solar cells with a single p-n junction. Such performance indicators were achieved due to the reduction of the AlGaAs/GaAs front layer thickness to 30-50 nm, the crystallization of high-quality material in the active region, and the creation of a back potential barrier made of GaAs. In recent years, the MOS-hydride epitaxy (metal- organic phase epitaxy) method has been widely used to produce AlGaAs/GaAs heterostructures for solar cells [6]. A heterostructural solar cell obtained by this method with a Br e gg mirror is of great interest (Fig .1). The reflection coefficient from such glass is $\sim 95\%$ in the 750 - 900 nm spectral range. This ensures that part of the solar radiation not absorbed in the base layer is reflected in the active region, which ensures that the thickness of the base region decreases and the diffusion is maintained with small values of the bending length. As a result, the radiation resistance of solar cells increases. Solar cells based on AlGaAs/GaAs heterostructures are currently widely used in solar cells due to their high efficiency and increased radiation resistance.



1. Cascade photoelements

A further increase in efficiency is provided by cascade solar cells manufactured on the basis of multilayer heterostructures with two or more p-n junctions in materials with different band gaps (Fig. 2). This design uses GaAs as the wide-gap element material and InGaAs or GaSb as the narrow-gap element. In such cells, the "top" p-n junction, made of a wider-gap material, is designed to efficiently convert the short-wavelength portion of solar radiation into energy , and the "bottom" p-n-junction, a narrow-gap material, is optimized to convert the long-wavelength radiation that passes through the broadband element into energy. Theoretical calculations show that more than 40% energy efficiency can be achieved in such complex photoconverters. As we mentioned above, one of the most promising materials for creating highly efficient solar cells is gallium arsenide. Gallium arsenide and a photocell based on it can consist of several layers - heterostructures of different composition. Usually, a very thin layer of AlGaAs is obtained as a GaAs-based heterostructure mirror. But the main disadvantage of gallium arsenide is its high cost. In order to reduce the cost of production, it is necessary to form solar cells on other cheaper substrates.

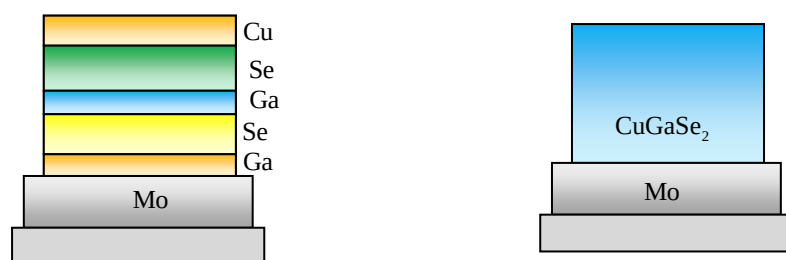
Copper and indium diselenide (CuInSe_2) has an extremely high ability to absorb solar radiation - 99% of light is absorbed in the first micron of this material (band gap 1.0 eV) [2,5]. At the moment, intensive efforts have been started to produce solar cell glass based on CuInSe_2 . Sometimes zinc is added to cadmium sulfide to improve the transparency of the glass. CuInSe_2 increases the band gap in layer , which leads to an increase in the open-circuit voltage and, as a result, to an increase in the efficiency of the device.

Physical processes of cascade photocells

Most solar cells are basically large area p-n junctions. When light shines on them, they can generate current and voltage. The reason this happens is between p-type and n-type material is the generated electric field. First let's see what happens if a silicon solar cell (pn junction) has a low resistance wire externally connected between the p and n contacts. In the dark, the solar cell does not generate current. When light shines on the solar cell, current flows through the wire from the p-type side to the n-type side (conventional current). The light has enough energy to break some of the chemical bonds in the silicon crystal. What this means is that the electrons normally involved in the silicon bond move to a higher energy state when exposed to light and the bond is broken. The intensity of the sun's light on the earth 's surface is strong enough to break about 1 bond for every 100 million silicon atoms in the solar cell. Excited electrons are similar to electrons of additional phosphorus atoms - they move freely through the material. Similarly, the vacancies created by light act as holes, just like the unpaired electrons in the bonds between silicon and boron atoms and these holes can also move freely through the material. Electrons and holes created in this way are physically close to each other: for each electron excited by light, a corresponding hole is created. These electrons and holes can only remain excited for a short time . In the recombination process, the excited electrons come very close to the holes, and both are placed in bonded positions. As this process occurs, the electrical energy of the pair is lost as heat. If there is too much recombination, the efficiency of the solar cell decreases.

In a solar cell, electrons and holes excited by light appear throughout the volume of the material, in the p-region, n-region, and in the field region where the generated electric field exists. Due to the "set" electric field, the electrons are attracted to the positive charge from the side of the p -type material. Similarly, holes are attracted to the negative charge on the n -type material side. This separation of charges causes current to flow across the junction. The direction of current (conventional current) is the same as the movement of holes (because they are positively charged). That is, the current flows across the field from the n-type side to the p-type side. Now there is voltage across the solar cell but no current from the solar cell. The "open circuit voltage" is measured by placing a voltmeter across the illuminated solar cell. For example, for a solar cell, it measures about 0.6 volts in strong sunlight. When an open-junction solar cell is illuminated, the light-generated electrons and holes orbiting near the junction are separated by an "embedded" electric field. Electrons are pushed into the n -type region and holes into the p -type region. The current produced by the light depends only on how intense the sunlight is and how much recombination takes place inside the solar cell. This charge pack creates a voltage across the solar cell. It can be imagined that this division of charge continues indefinitely, resulting in an infinite voltage across the solar cell.

To generate large amounts of energy from solar cells, it is enough to connect many solar cells together. It can generate a lot of power. In fact, many solar cells can be connected together to create a large solar power plant. Most modern solar cells have a single p-n junction. In such an element, free charge carriers are generated only by photons with energy greater than or equal to the bandgap. In other words, the photoelectric reaction of a single junction element is limited to the part of the solar spectrum with energy above the band gap, and low-energy photons are not used. This limitation can be overcome by multilayer structures of two or more elements with different band gaps. Such elements are called *cascade or tandem* [2].



FFig 2. The system of cascade photocell

Obtained scientific results and their analysis.

1. Current characteristics of heterostructured photoelectric systems

Each photocell is characterized by a number of parameters and properties that determine not only its characteristics, but also the limits of its use in technology: current - voltage, light, frequency and spectral sensitivity, efficiency. Similarly, heterostructured photoconductors have the above physical properties.

Studies have shown that these physical properties have almost the same meaning in both cases. Current-voltage and voltage-power characteristics of the system considered in Figure 3. It can be seen from the graph that the photocurrent flow in the element depends on constant temperature radiation. However, as the irradiance increases, the photocurrent and voltage increase. This leads to an increase in total power. In this case, for the characteristics of the heterostructure system, when the operating temperature increases, the current output increases slightly, while the voltage output decreases sharply, which affects the decrease in net power with the increase of temperature. The nominal voltage and current of the structure we are studying are described by the following general formulas

$$I = I_{ph} \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s} \exp \left(\frac{qE_g}{kA} \frac{1}{T_r - T} \right) \quad (1)$$

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

where T_r represents the initial temperature and the constant photocurrent of the element; $I_{tr} q$ is the charge of the electron; E_g - the main energy level of the conductor, T is the temperature of the element (K). The nominal voltage of the element is expressed by the following formula

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_s} + I. \quad (2)$$

Here I_s is the output current of the array; U array output voltage. The figure below shows the characteristic curves of the element for a given level of solar radiation and temperature.

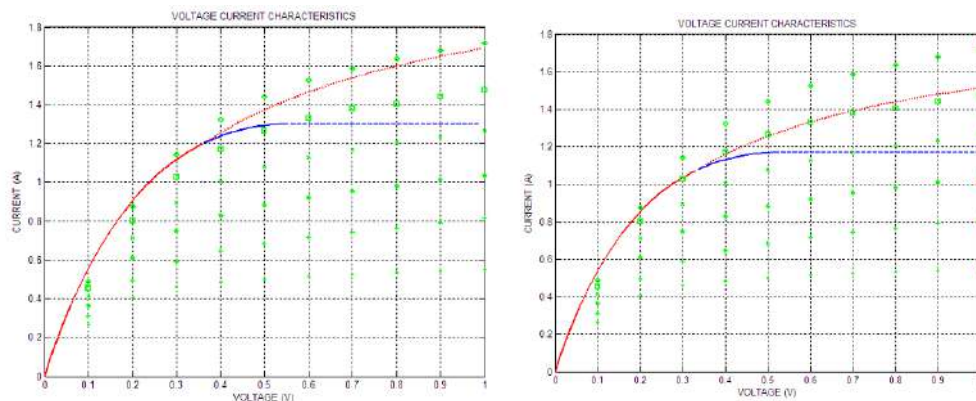


Fig.3 . Volt-amperes characteristics of the system in varying radiation with a temperature of 25° - 30° .

2. Useful efficiency of photoelectric systems with heterostructure

Today, cells made of heterostructured photovoltaic systems, such as A_3V_5 , make up 80% of systems installed worldwide. Their efficiency is 35-40 percent. Later, GaAs-AlGaAs heterostructure photoelectric systems began to be prepared in the form of amorphous silicon, cadmium-telluride thin films. Their efficiency is about 9 percent, but they are cheaper to manufacture than photovoltaic cells made of mono or polycrystalline silicon [3,7]. For example, let a heterostructured solar photovoltaic cell consist of several hundred (for example, 100) cells. Let its power be 1.5 W. In this case, the size of the photocell is 20·30 cm. We assume that the current density in the photocell is $E = 500 \text{ W/m}^2$ and we find the useful efficiency of the photocell. In that case, we find the efficiency of the photocell using the following formula

$$\eta = \frac{P}{ES}.$$

Here, P_b is the power of the battery, which is calculated using the following formula

$$P = n \cdot 15.$$

Here, n is the total number of photovoltaic cells in the heterostructure solar cell. Putting the values of the necessary quantities in the formula $P = 900 \cdot 15 = 1350 \text{ Br}$, $S = 0.06 \text{ m}^2 \cdot 900 = 54 \text{ m}^2$ we find the useful efficiency of the photocell

$$\eta = 135054 \cdot 500 = 0.05\%$$

The value of the efficiency of the photocell is determined by the energy losses, which depend on the materials used and the design of the photocell, as well as the choice of the operation mode of the photocell (load resistance, light and temperature). In the process of converting radiation energy into electrical energy released in the photocell load, energy losses can be divided into light and energy losses. Light losses are primarily losses due to the reflection of the light flux from the surface photocell and depend on the wavelength of the incident light. They are also determined by the photoelectric inactive absorption of light: absorption of the excitation, photon generation, absorption with excitation within the band transitions, absorption of the fraction of the light flux that has passed to a large depth along with the lower metal electrode.

Energy losses are the number of excited pairs of electrons and holes or the energy losses they carry. These losses are related to the recombination of carriers that do not reach p - n - depending on the construction of the transition and photocell, the thickness of the outer layer of the conductor and the condition of its surface. In addition, if the energy of light quanta significantly exceeds the band gap, then the excess energy is used to heat the photocell.

In figure 4 we present the results of Table 1, which shows the temperature dependence of fill factor and the efficiency of the PV panel.

Table 1.

Temperature($^{\circ}\text{C}$)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
10	77.33	17.57
20	75.85	16.27
thirty	74.56	14.99

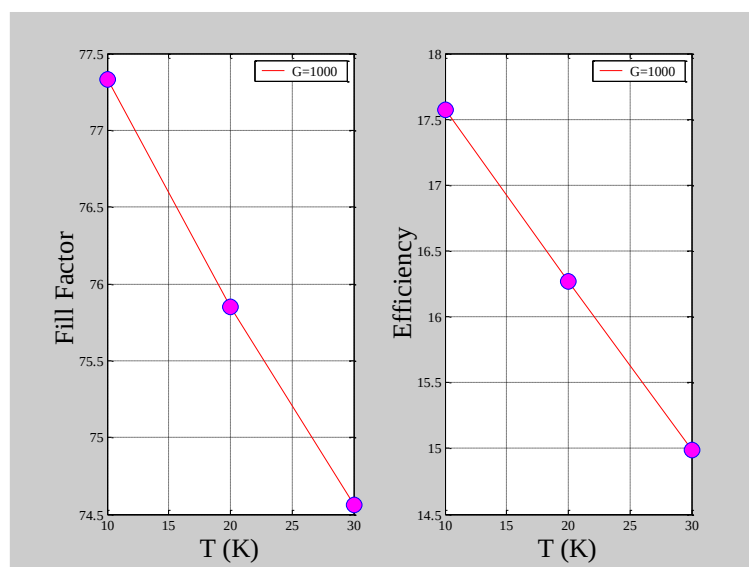


Fig.4. The fill factor and efficiency of the system in varying radiation with a temperature of 25° - 30°

At the same time, scientific and research work is being carried out to increase the efficiency of heterostructured solar photovoltaic cells by 50-60%. For this, it is necessary to install heterostructured films 4÷8 times. As a result of these studies, the power of the device will be increased and the cost of production will decrease dramatically. It is estimated that, due to their simplicity and low-cost materials, in the future, the production of devices consisting of heterostructures will require even less money.

Conclusion. In this article, the physical properties of photocells based on the heterostructure of the solar energy device were studied. The volt-ampere characteristics of the G heterostructure solar cell photocell and the values of the useful work coefficient were determined. Our studies have shown that the photocurrent flow in the element depends on constant temperature radiation. As the irradiance increases, the

photocurrent and voltage increase. This leads to an increase in total power. It can be concluded that, the solar cells based on heterostructures have very high efficiency and high radiation resistance.

REFERENCES:

1. Udalov N. S. *Renewable energy*. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2009. - 412 p. - S. 305-306.
2. Vissarionov V. I. *Colnechnaya energetika : uchebnoe posobie dlya vuzov*. - Moscow: Izdatelsky dom MEI, 2008. - 320 p. - S. 113-115.
3. Tailanov N. *Fiziko-technologicheskogo obrazovanie useful work coefficient of a heterostructure solar cell photocell*. - 2020. - No. 1.
4. Mestnikov, A.E. *Teplovaya zashchita zdaniy na severe: material, design, construction*. A. E. Mestnikov, P. S. Abramova. M.: Izdatelstvo AVS, 2009. – 5 – 10 p.
5. Khristoforova T.A. *We introduce new energy-efficient technologies*. T.A. Khristoforova. *Energoberezhenie v Yakutii*. 2017. No. 6 (12). S. 10-11.
6. Tailanov N.A. *Analysis of energy parameters of an autonomous solar power plant in Arnasai district*. *Uzbek physical journal*, volume 20, number 1, 2018.
7. Tailanov N.A. *Raschet energeticheskikh parameters solnechnoy elektrostantsii*. *International scientific conference. "The Role of Ginseng in Modern Science and Technology"* April 12-14, 2017, Dzhizak Polytechnic Institute, Uzbekistan. Djizak, Uzbekistan.

YARIMO'TKAZGICH TRANZISTORLAR ASOSIDA REAKTIV QUVVATNI OPTIMALLASHTIRISH VA ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH

Majidova Gulnoza Nurmuxamedovna,

Namangan davlat texnika Universiteti, PhD

Islom Karimov ko'chasi, 12 uy,

m.gulnoza.1985@gmail.com.

Xusanboyev Shoxruxbek Zafarjon o'g'li,

Namangan davlat texnika Universiteti magistranti

xusanboyevshoxrux55@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada yarimo'tkazgichli qurilma ya'ni tranzistor yordamida elektr stansiyalarida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash usullari, ularning ishlash prinsiplari hamda energiya isrofini kamaytirishdagi roli tahlil qilingan. Reaktiv quvvatni tranzistorlarni boshqarish orqali kuzatilgan va bu holda tranzistor orqali boshqariladigan kompensatsiyalar zamonaviy qurilmalarda STATCOM, inverterlarni boshqarish imkoniga ega bo'lish imkoniyatlari ko'rsatilgan. Tranzistorlarning reaktiv quvvatni kompensatsiyalashdagi roli nafaqat tizimning ishlash sifatini yaxshilash, balki energiya isrofining kamayishida ham muhim ahamiyatga ega ekanligi tahlil qilingan.

Kalit so'zlar: Reaktiv quvvat, emitter toki, kollektor toki, rekombinatsiya, generatsiya, energiya samaradorligi, elektr stansiyasi

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Аннотация. В данной статье рассматриваются методы компенсации реактивной мощности на электрических станциях с использованием полупроводниковых устройств, а именно транзисторов, а также анализируются их принципы работы и роль в снижении энергетических потерь. Реактивная мощность исследуется посредством управления транзисторами, при этом показаны возможности применения управляемых транзисторных компенсаторов в современных устройствах, таких как STATCOM и инверторы. Установлено, что использование транзисторов для компенсации реактивной мощности не только улучшает качество работы системы, но и играет важную роль в снижении потерь энергии.

Ключевые слова: реактивная мощность, ток эмиттера, ток коллектора, рекомбинация, генерация, энергоэффективность, электрическая станция

OPTIMIZATION OF REACTIVE POWER AND IMPROVEMENT OF ENERGY EFFICIENCY BASED ON SEMICONDUCTOR TRANSISTORS

Abstract. This article examines methods of reactive power compensation in power plants using semiconductor devices, particularly transistors, and analyzes their operating principles as well as their role in reducing energy losses. Reactive power is studied through transistor control, and the possibilities of transistor-based compensation in modern devices such as STATCOM and inverters are demonstrated. It is shown that the use of transistors for reactive power compensation not only improves system performance but also plays a significant role in reducing energy losses.

Keywords: reactive power, emitter current, collector current, recombination, generation, energy efficiency, power plant

Kirish. Bugungi kunda elektr energetika tizimlarida samaradorlikni oshirish, energiya isrofini kamaytirish va elektr tarmoqlarining ishonchli ishlashini ta'minlash dolzarb masalalardan sifatida qaralmoqda. Ayniqsa, sanoat va elektr stansiyalarida reaktiv quvvatning ortiqcha bo'lishi kuchlanish yo'qotishlariga, tarmoq yuklanishining oshishiga hamda energiya samaradorligining pasayishiga olib keladi. Shu sababli reaktiv quvvatni kompensatsiyalash masalasi hozirda zamonaviy energetikaning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanmoqda [1-2].

So'nggi yillarda yarimo'tkazgichli qurilmalar asosida ishlab chiqilgan qurilmalar yuqori tezkorlik, aniqlik va avtomatlashtirilgan boshqaruv imkoniyatlariga ega bo'lib, elektr tarmoqlarida reaktiv quvvatni samarali boshqarish imkonini beradi. Shu bilan birga, ular elektr energiyasining yo'qotilishini kamaytirish, kuchlanish sifatini yaxshilash va umumiy energetik tizim samaradorligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etadi [3].

Biz bu maqolada yarimo'tkazgichli qurilmalar yordamida elektr stansiyalarida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash usullari, ularning ishlash prinsiplari hamda energiya isrofini kamaytirishdagi roli tahlil qilmoqchimiz.

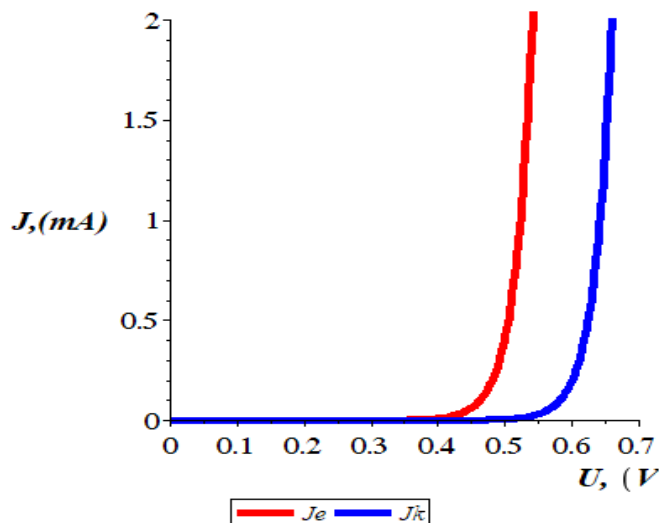
Yani tranzistorning yarimo'tkazgichli qurilmalar sifatida tanlab oldik. Chunki elektr stansiyalarida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash va energiya isrofini kamaytirishda tranzistorning ahamiyati kattadir. Yarimo'tkazgichli tranzistorlar zamonaviy elektronikaning asosiy elementlaridan biri bo'lib, elektr stansiyalarida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash tizimlarida ham muhim rol o'ynaydi. Tranzistorlarning tezkorlik, ishonchlilik va samaradorlik xususiyatlari yuqori bo'lgani sababli ular kuchlanish va tok signallarini aniqlik bilan boshqarish imkonini beradi. Bu esa reaktiv quvvatni tez va samarali kompensatsiyalash imkonini yaratadi [5].

PNP turdagi tranzistorda emitter toki asosiy zaryad tashuvchilar oqimini va kollektor toki esa chiqish tokini ifodalaydi. Albatta bu toklar baza toki yoki kuchlanish orqali boshqariladi. Kichik signal orqali katta tokni boshqarish imkonini beradi. Tranzistorning emitter va kollektorida hosil bo'lgan teshik tokini tranzistorni effektiv rejimda ishlayapti deb qarasa u holda hususiy hol uchun shart tanlab olamiz[6]. $\frac{qU_E}{kT} \gg 1$ va $\exp\left(-\frac{qU_K}{kT}\right) = 0$ bo'lsa u holda $d \ll L_p$ bo'lgani uchun emitter va kollektordagi teshik toki qo'yidagi formula orqali ifodalanadi.

$$J_{pe} = \frac{qn_p D_n}{L_n} \left(\exp\left(\frac{qU_E}{kT}\right) - 1 \right) \coth \frac{d}{L_p} \quad (1)$$

$$J_{pk} = \frac{qn_p D_n}{L_n} \left(\exp\left(\frac{qU_E}{kT}\right) - 1 \right) \operatorname{csch} \frac{d}{L_p} \quad (2)$$

(1) va (2) ifodalarga tajribalarda olingan sonli qiymatlarni qo'yib VAXni olamiz.



1-rasm. Emitter va kollektordagi teshik tokining VAXi

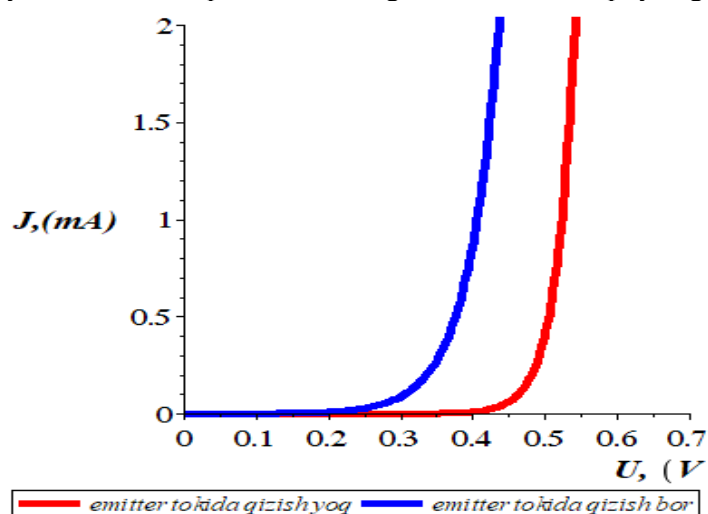
Bu grafiklarda hosil bo'lgan farqlarning sababi shundaki nazariy jihatdan $I_E = I_C + I_B$ ga teng bo'ladi. Agar baza juda yupqa va yo'qotishlar bo'lmasa u holda $I_C \approx I_E$ ga teng bo'lishi kerak. Lekin farqlarni hosil bo'lishi rekombinatsiya jarayoniga bog'liqdir. Yani emitterdan chiqqan teshiklar (kovaklar) bazaga kiradi. Ammo ularning hammasi kollektor tomonga o'tmaydi. Bir qismi baza ichida elektronlar bilan rekombinatsiyalanadi. Natija emitter toki (J_e) katta va kollektor toki (J_k) esa kichikroq bo'ladi. Chunki $J_k = J_e - J_{y\dot{q}otish}$ ga tengligi sabab bo'ladi.

Agar zaryad tashuvchilarni qizishi e'tiborga olinsa, u holda (1) va (2) ifodamiz qo'yidagicha ko'rinishda bo'ladi.

$$J_{pe} = \frac{q n_p D_n}{L_n} \left(\exp \left(\frac{q \varphi}{kT} - \frac{q(\varphi - U_e)}{kT_e} \right) - 1 \right) \coth \frac{d}{L_p} \quad (3)$$

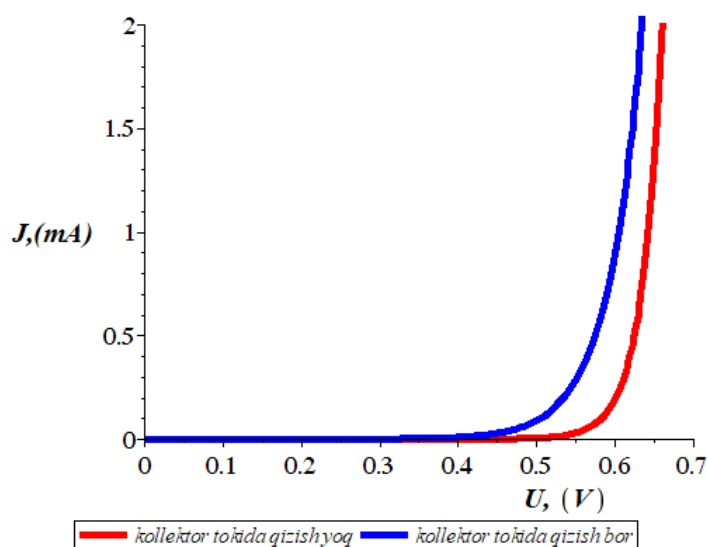
$$J_{pk} = \frac{q n_p D_n}{L_n} \left(\exp \left(\frac{q \varphi}{kT} - \frac{q(\varphi - U_e)}{kT_e} \right) - 1 \right) \operatorname{csch} \frac{d}{L_p} \quad (4)$$

Ushbu formulalarga adabiyotlarda keltirilgan tegishli sonli qiymatlarni qo'yib taqossab chiqaylik. Agar emitter tokidagi zaryad tashuvchini qizishini e'tiborga olsak VAXlari qo'yidagicha tus olar ekan.

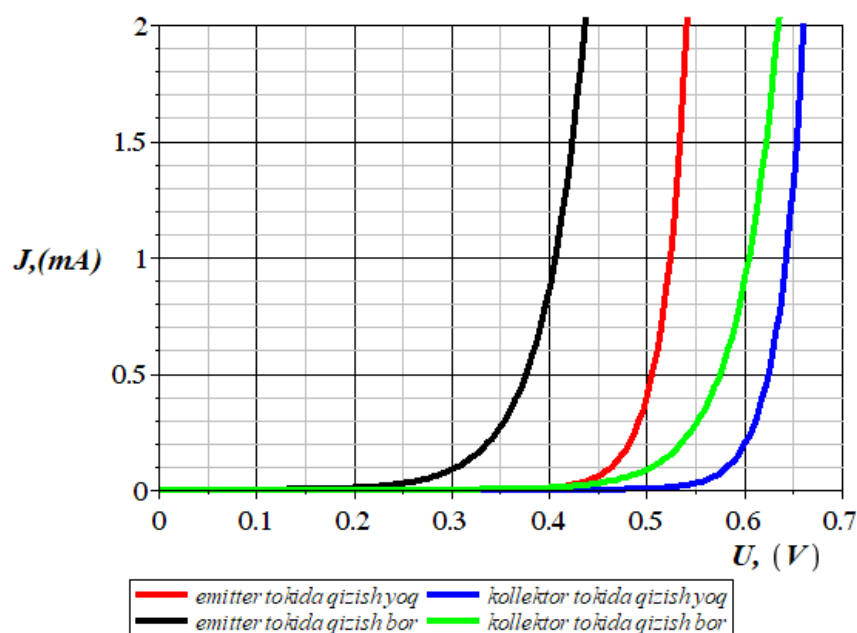


2-rasm. Emitter tokida qizish ta'sirida VAX o'zgarishi

Aksincha kollektor tokida esa 3-rasmda keltirilgan holga keladi.



3-rasm. Kollektor tokida qizish ta'sirida VAX o'zgarishi



4-rasm. Emitter va kollektor toklarida qizish ta'sirida VAX o'zgarishi

4 rasmdagi grafikdan ko'rinadiki zaryad tashuvchini qizish hisobiga qora va yashil chiziqlar chapga siljigan bo'lib, kamroq kuchlanishda ham katta tok oqishini ko'rsatadi. Ya'ni materialning qarshiligi kamayadi. Chunki harorat oshganda yarim o'tkazgichda erkin zaryad tashuvchilar soni ortadi. Bu jarayon u esa tokni oshiradi.

Agar qizish bo'lmasa qizil va ko'k chiziqlarga ko'ra tok faqat kuchlanish oshganda tez o'sadi.

Emitter toki qizil va qora rangdagi grafiklar emitter o'tish to'g'ri yo'nalishda bo'lgani uchun ochilishi oldinroq boshlanib, kichik kuchlanishda tok paydo bo'ladi. Kollektor toki esa ko'k va yashil rangdagi grafiklar kattaroq kuchlanishda boshlanadi. Chunki kollektor o'tish boshqa sharoitda ishlaydi. Ularga odatda teskari yoki kuchliroq maydonta'sir qilish kerak bo'ladi.

ndi elektr stansiyalarda reaktiv quvvatni boshqarishni ko'rib chiqsak [8].

Reaktiv quvvat ifodasi $Q = UI \sin \varphi$ ga ko'ra temperature orasida bog'lanish mavjud emas. Agar biz tokni odatda temperaturaga bog'liq (ayniqsa metall o'tkazgichlarda) bo'ladi deb olsak, u holda qarshilik

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (5)$$

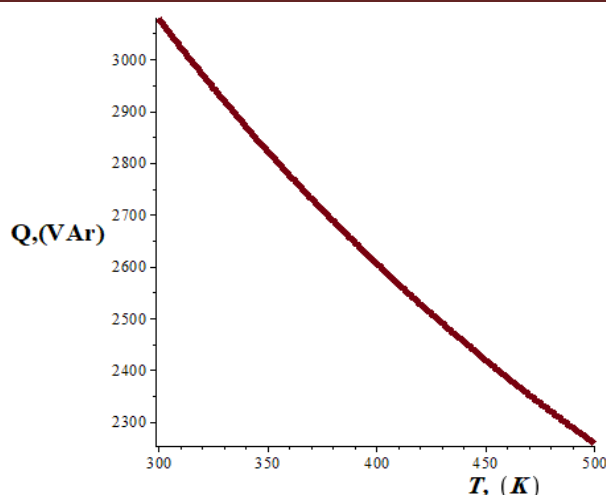
Om qonuniga ko'ra tok kuchi

$$I(T) = \frac{U}{R(T)} \quad (6)$$

ga tengligidan reaktiv quvvatni qo'yidagicha ifodalashimiz mumkin bo'ladi.

$$Q(T) = U \cdot \frac{U}{R_0(1 + \alpha T)} \cdot \sin \varphi \quad (7)$$

Ushbu (7) ifodaga $U = 220 \text{ V}$, $\sin \varphi = 0.7$, $\alpha \approx 0.004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ va $R_0 = 50 \text{ m}\Omega$ sonli qiymatlarni qo'yib reaktiv quvvatni xaroratga bog'liqlik grafigini olishimiz mumkin.



5-rasm. Reaktiv quvvatni xaroratga bog'liqligi

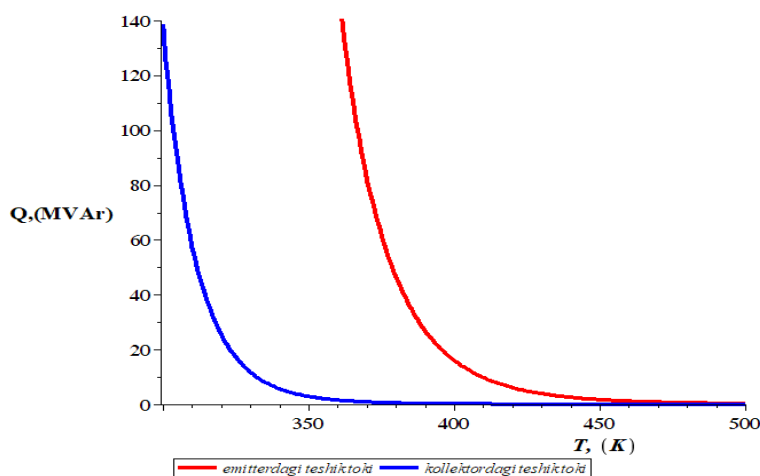
Bu holatda tok va kuchlanish fazasi mos bo'lmaganligi uchun natijada energiya yo'qotishlar paydo bo'ladi.

Agar biz reaktiv quvvatni tranzistorlarni boshqarish orqali kuzatsak, u holda tranzistor orqali boshqariladigan kompensatsiyalar zamonaviy qurilmalarda STATCOM, inverterlarni boshqarish imkoniga ega bo'lamiz[9].

Yani tranzistorda zaryad tashuvchilar harakati tokni hosil qiladi. Energetik tizimda esa shu tok orqali fazani boshqaramiz. Buning uchun (1) va (2) ifodalardagi emitter va kollektordagi teshik toklarini reaktiv quvvat ifodasiga olib borib qo'ysak. Hamda tegishli son qiymatlarni e'tiborga olinsa u holda reaktiv quvvat va harorat orasida qo'yidagi grafik hosil bo'lar ekan.

Bu grafiklardan ko'rinadiki emitter – kollektor toki inverter chiqish tokini belgilaydi. Tranzistor tez ochilib-yopilib, tok amplitudasini, tok fazasini va tok shaklini boshqaradi. Natijada esa zaryad tashuvchilarni boshqarish orqali chiqish toki aniq shakllantiriladi. Faza siljishi, reaktiv quvvat va energiya yo'qotish kamayadi.

Reaktiv quvvatning asosiy maqsadi kuchlanishni ushlab turish va elektromagnit jarayonlarni ta'minlashga qaratilgan. Lekin ortiqcha yoki kam bo'lishi – ikkalasi ham muammoga olib keladi. Agar reaktiv quvvat yetarli bo'lsa bu optimal holat hisoblanib, kuchlanish barqaror bo'ladi. Tarmoq samarali ishlashiga va yo'qotishlar kamayishiga olib keladi [10]. Yoki reaktiv quvvat juda katta bo'lsa tok ortib ketadi. Natijada simlar qiziydi va energiya yo'qotishlari ortib ketadi. bu esa uskunalar ortiqcha yuklanishiga sabab bo'ladi. Aksincha juda kichik bo'lsa kuchlanish pasayib dvigatellar yomon ishlashni boshlaydi. Tarmoq esa beqaror bo'ladi Yirik podstantsiyalar va elektr stansiyalar uchun normal diapazon reaktiv quvvat uchun 10 – 500 MVar ko'rsatilgan. 6-rasmda keltirilgan grafikda sonli qiymatlar ham shu diapason orasiga kiradi [11].



6-rasm. Emitter va kollektordagi tokni boshqarish orqali reaktiv quvvatni haroratga bog'liq o'zgarishi

Xulosa. Tranzistor orqali zaryad tashuvchilar harakati boshqarilgani uchun emitter va kollektor toklarini ham boshqarish mumkin. Bu esa bizga tarmoqqa beriladigan tokni boshqarish, fazani to'g'rilash, reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish va energiya isrofini kamaytirishga imkon yaratadi

Elektr stansiyalarida yarimo'tkazgichli tranzistorlarga asoslangan kuchaytirgichlar, invertorlar va boshqa boshqaruv elementlari reaktiv komponentlarni aniqlab, ularga qarshi kerakli qarshilik yoki induktivlik kiritishni avtomatik tartibda amalga oshiradi. Natijada, tarmoqdagi kuchlanish va tokning fazoviy farqi kamayadi, bu esa energiya yo'qotilishini sezilarli darajada kamaytiradi.

Shuningdek, tranzistorlar yordamida ishlovchi zamonaviy kompensatsiya tizimlari an'anaviy mexanik yoki elektromexanik qurilmalarga nisbatan tezkorroq javob beradi va yanada ixcham, samarali tizimlarni yaratishga imkon beradi. Bu esa elektr energiyasidan oqilona foydalanishni ta'minlash, uskunalarning xizmat muddatini uzaytirish va umumiy energetik samaradorlikni oshirishga xizmat qiladi.

Shunday qilib, tranzistorlarning reaktiv quvvatni kompensatsiyalashdagi roli nafaqat tizimning ishlash sifatini yaxshilash, balki energiya isrofining kamayishida ham muhim ahamiyatga ega.

ADABIYOTLAR:

1. Rashid, M. H. *Power Electronics Handbook*, Butterworth-Heinemann, 2017.
2. Hu, J., Ismail, M. *CMOS High Efficiency On-chip Power Management*, Springer, 2011.
3. Taur, Y., Ning, T. H. *Fundamentals of Modern VLSI Devices*, Cambridge University Press.
4. Zheng, W. va boshqalar *A Fully Distributed Reactive Power Optimization and Control Method*, 2014.
5. Šulc, P., Backhaus, S., Chertkov, M. *Optimal Distributed Control of Reactive Power*, 2013
6. M. A. Azizov. *Yarimo'tkazgichlar fizikasi/ O'qituvchi nashriyoti*, Toshkent 1974y
7. Sujin, P. R. va boshqalar *Particle Swarm Optimization Based Reactive Power Optimization*, 2010.
8. Acar, L. va boshqalar *Reactive Power Compensation: A Review*, IEEE.
9. MDPI (*Energies* jurnali) *Voltage and Reactive Power Regulation Systems Analysis*, 2022.
10. Dini, P. va boshqalar *Reliability of Power Semiconductor Modules*, IEEE, 2025.
11. Paul, B. C. va boshqalar *Low-Power CMOS VLSI Circuit Design*, IEEE.

Ga₂Gd MATERIALLARINING UMUMIY XUSUSIYATLARI**Ibodova Maftunabonu Ilyoz qizi,**

Buxoro davlat universiteti tayanch doktoranti

m.ibodova2000@gmail.com**Fayziyev Shaxobiddin Shavkatovich,**

Buxoro davlat universiteti Fizika kafedrası dotsenti

s.s.fayziev@buxdu.uz

Annotatsiya. Mazkur tadqiqot ishida Ga-Gd ikkilik tizimiga mansub Ga₂Gd intermetall birikmasining kristall tuzilishi, termodinamik barqarorligi hamda fizik xossalari kompleks ravishda tahlil qilindi. Zamonaviy materialshunoslikda noyob yer elementlari asosidagi intermetall birikmalar yuqori funksional xususiyatlari bilan ajralib turishi sababli, ushbu tizim ilmiy va amaliy jihatdan muhim hisoblanadi.

Ishda galliy va gadoliniiy elementlarining individual fizik xossalari hamda ularning o'zaro ta'siri natijasida hosil bo'ladigan elektron va magnit holatlar o'rganildi. Ga₂Gd birikmasining kristall tuzilishi geksagonal tizimga mansubligi, panjara parametrlarining ($a=b\neq c$, $\gamma=120^\circ$) qiymatlari hamda atomlarning Wyckoff pozitsiyalarda joylashuvi asosida aniqlashtirildi. Tadqiqotda CALPHAD metodologiyasi asosida Ga-Gd tizimining fazaviy muvozanati va Gibbs erkin energiyasi funksiyalari tahlil qilinib, tizimda beshta asosiy intermetall faza mavjudligi aniqlangan. Ular orasida Ga₂Gd fazasi keng gomogenlik sohasi va past Gibbs erkin energiya qiymati bilan ajralib turadi, bu esa uning yuqori termodinamik barqarorligini ko'rsatadi. Olingan natijalar Ga₂Gd birikmasida metallik va qisman kovalent bog'lanishlar mavjudligini, shuningdek Gd atomlarining f-elektronlari hisobiga magnit xossalarning shakllanishini tasdiqlaydi. Ushbu xususiyatlar materialni spintronika, magnitoptika va yarimo'tkazgich qurilmalarida qo'llash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: Ga-Gd ikkilik tizimi, Wyckoff pozitsiyalari, Gibbs erkin energiyasi, CALPHAD metodi, intermetall fazalar, spintronika, konkoidal sinish.

ОБЩИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ Ga₂Gd

Аннотация. В данной работе проведён комплексный анализ интерметаллического соединения Ga₂Gd, относящегося к бинарной системе Ga-Gd, включая его кристаллическую структуру, термодинамическую стабильность и физические свойства. В современной науке о материалах интерметаллические соединения на основе редкоземельных элементов представляют значительный научный и практический интерес благодаря их высоким функциональным характеристикам.

В работе исследованы индивидуальные физические свойства элементов галлия и гадолиния, а также электронные и магнитные состояния, формирующиеся в результате их взаимодействия. Установлено, что кристаллическая структура соединения Ga₂Gd относится к гексагональной сингонии с параметрами решётки ($a = b \neq c$, $\gamma = 120^\circ$), при этом пространственное распределение атомов уточнено на основе их расположения в позициях Уайкоффа. С использованием методологии CALPHAD проведён анализ фазового равновесия и функций свободной энергии Гиббса в системе Ga-Gd, в результате чего выявлено существование пяти основных интерметаллических фаз. Среди них фаза Ga₂Gd характеризуется широкой областью гомогенности и низкими значениями свободной энергии Гиббса, что свидетельствует о её высокой термодинамической стабильности. Полученные результаты подтверждают наличие в соединении Ga₂Gd металлической и частично ковалентной природы химической связи, а также формирование магнитных свойств за счёт f-электронов атомов гадолиния. Указанные характеристики открывают перспективы применения данного материала в спинтронике, магнитооптике и полупроводниковых устройствах.

Ключевые слова: бинарная система Ga-Gd, позиции Wyckoff, свободная энергия Гиббса, метод CALPHAD, интерметаллические фазы, спинтроника, конхoidalный излом.

GENERAL PROPERTIES OF Ga₂Gd MATERIALS

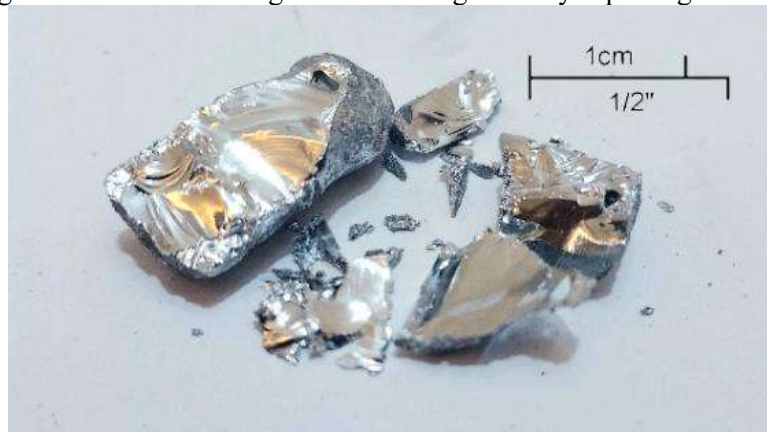
Abstract. In this study, a comprehensive analysis of the intermetallic compound Ga₂Gd belonging to the Ga-Gd binary system is presented, including its crystal structure, thermodynamic stability, and physical

properties. In modern materials science, intermetallic compounds based on rare-earth elements are of significant scientific and practical interest due to their advanced functional characteristics.

The individual physical properties of gallium and gadolinium, as well as the electronic and magnetic states arising from their interaction, are systematically investigated. It is established that the crystal structure of Ga_2Gd belongs to the hexagonal system with lattice parameters ($a = b \neq c$, $\gamma = 120^\circ$), and the atomic arrangement is clarified based on their occupation of Wyckoff positions. Using the CALPHAD methodology, the phase equilibria and Gibbs free energy functions of the Ga-Gd system were analyzed, revealing the presence of five principal intermetallic phases. Among them, the Ga_2Gd phase is distinguished by a wide homogeneity range and low Gibbs free energy values, indicating its high thermodynamic stability. The obtained results confirm the coexistence of metallic and partially covalent bonding in Ga_2Gd , as well as the formation of magnetic properties due to the contribution of f-electrons from gadolinium atoms. These features make the material a promising candidate for applications in spintronics, magneto-optics, and semiconductor devices.

Keywords: Ga-Gd binary system, Wyckoff positions, Gibbs free energy, CALPHAD method, intermetallic phases, spintronics, conchoidal fracture.

Kirish. Zamonaviy materialshunoslikda yuqori funksional xossalarga ega yangi materiallarni yaratish muhim ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etmoqda. Ayniqsa, noyob yer elementlari asosidagi intermetall birikmalar o'zining noyob magnit, elektron va optik xususiyatlari bilan alohida e'tiborni tortadi. Shu nuqtayi nazardan galliy (Ga) va gadolinii (Gd) elementlari asosida hosil bo'ladigan ikkilik tizimlar istiqbolli materiallar sinfiga kiradi. *Ga elementining fizik xossalari:* Galliy Fransuz kimyogari Pol-Emil Lekok de Buaboudran tomonidan 1875-yilda Parijda (Fransiya) kashf etilgan [1] elementar galliy standart harorat va bosimda yumshoq, kumushrang metallidir. Suyuq holatda u kumushrang oq rangga aylanadi. Agar yetarli kuch qo'llanilsa, qattiq galliy konkoid tarzda yorilishi mumkin. Mindat.org konkoidal sinishini quyidagicha ta'riflaydi: "silliqlik, egri yuzalarga ega, odatda biroz botiq, qobiqlik o'sishi chiziqlariga o'xshash konsentrik to'liqlarni ko'rsatadigan sinish". [2] Elementar galliy tabiatda uchramaydi, lekin uni eritish orqali osongina olish mumkin. Juda sof galliy kumushrang ko'k metall bo'lib, shisha kabi konkoid tarzda yoriladi. Galliy suyuq holatdan qattiq holatga o'tganda uning hajmi 3,10% ga kengayadi, shuning uchun uni holati o'zgarganda yorilishi mumkin bo'lgan idishlarda saqlashda ehtiyot bo'lish kerak. Galliy ko'pgina metallar bilan qotishmalar hosil qiladi. U alyuminiy, alyuminiy - rux qotishmalari [3] va po'lat [4] kabi ba'zi metallarning yoriqlari yoki dona chegaralariga osongina tarqaladi, bu esa suyuq metall mo'rtlashuvi deb ataladigan mustahkamlik va egiluvchanlikning keskin yo'qolishiga olib keladi.



1-rasm. Galliy novdasi kristall tuzilishini [5]

Gd elementining fizik xossalari: Gadolinii lantanoidlar qatorining sakkizinchi a'zosi. Gadolinii (Gd) — noyob yer metallari (lantanoidlar) guruhiga kiruvchi element bo'lib, o'ziga xos fizik xossalarga ega. Tashqi ko'rinishi va holati: kumushsimon-oq rangli metall, yumshoq va nisbatan oson kesiladi, havoda asta-sekin oksidlanadi. Kristall tuzilishi: geksagonal zich joylashgan kristall panjara, yuqori haroratlarda kristall tuzilishi o'zgarishi mumkin.



2-rasm. Gadoliniiy metalining namunasi [6]

Ga_2Gd - bu intermetall birikma bo'lib, unda galliy va gadoliniiy o'zaro murakkab elektron va magnit o'zaro ta'sirga kirishadi. Galliy atomlari: kristall panjarada asosiy skelet hosil qiladi Gd atomlari shu panjarada joylashadi. Natijada barqaror intermetall struktura yuzaga keladi $Ga \rightarrow$ **p-elektron donor**; $Gd \rightarrow$ **f-elektronlarga ega (magnit aktiv)**. Bu kombinatsiya: elektron zichlikni qayta taqsimlaydi, metallik va qisman kovalent bog'lanishlarni yuzaga keltiradi. Ga ning ishtiroki tufayli: elektron harakatchanligi oshadi; optik xossalar yaxshilanadi; magnit tartiblanish boshqariladi. Shu sababli Ga_2Gd : spintronika, magnitooptika, yuqori texnologiyali qurilmalarda qo'llanilishi mumkin. Ga-Gd ikkilik tizimi murakkab fazaviy tuzilishga ega bo'lib, unda bir qator intermetall birikmalar, jumladan Ga_6Gd , Ga_2Gd , $GaGd$, Ga_2Gd_3 va Ga_3Gd_5 fazalari mavjud. Ushbu fazalar turli kristall tuzilishga ega bo'lib, ayrimlari ferromagnit yoki antiferromagnit xossalarni namoyon qiladi. Ayniqsa, Ga_2Gd birikmasining keng gomogenlik sohasi mavjudligi uni chuqurroq o'rganishni talab etadi.

Nazariy qism. Galliy ko'plab sanoat qo'llanmalariga ega, u integratsiyalashgan raqamli sxemalarda substratlar sifatida fosfid (GaP) va arsenid ($GaAs$) [7] shaklida qo'llaniladi. Shuningdek, u juda past quvvatli yoritish uchun yarimo'tkazgichlar ishlab chiqarishda va fotovoltaiik panellarni ishlab chiqishda qo'llaniladi [7]. Bundan tashqari, noyob yer elementlari o'zlarining fizik xususiyatlarining boyligi tufayli yangi materiallarni ishlab chiqishda katta qiziqish uyg'otadi. Ushbu ishda Ga-Gd binar tizimi CALPHAD [8] texnikasi yordamida optimallashtirildi, bu yerda termodinamik xarakteristikalar barcha fazalarning Gibbs erkin energiyasi uchun termodinamik modellar yordamida tahlil qilinadi. Ga-Gd ikkilik tizimi birinchi marta 1976-yilda Buschow va boshqalar tomonidan [9] rentgen kabi turli eksperimental usullar yordamida o'rganilgan. Ushbu mualliflar to'rtta intermetall birikmalar bilan faza diagrammasini aniqladilar: Ga_2Gd , $GaGd$, Ga_2Gd_3 va Ga_3Gd_5 . Ular Ga_2Gd_3 va Ga_3Gd_5 intermetall birikmalari antiferromagnit, $GdGa$ birikmasi esa ferromagnit ekanligini ta'kidladilar. Bundan tashqari, Yatsenko va Semyannikov [10] ham Ga-Gd tizimini o'rganishdi. Ular Ga va Gd o'zaro ta'sir qilib, $1400^\circ C$ da eriydigan $GaGd$ birikmasini, shuningdek, uchta boshqa parchalanuvchi birikmalarni: Ga_2Gd_3 va Ga_3Gd_5 va $GaGd$ hosil qilishini aniqladilar. Ular diagrammaning galliyga boy qismida suyuqlik chizig'ini aniqlash uchun Yatsenko [11] tomonidan nashr etilgan suyuq Ga tarkibidagi Gd ning eruvchanlik ma'lumotlaridan foydalanganlar.

Yaqinda Pelleg va Zevin [12] Ga-Gd ikkilik tizimining galliyga boy qismidagi faza diagrammasini rentgen difraksiyasi, termal tahlil va metallografiya orqali o'rganishdi. Ular $379^\circ C$ da intermetallik birikmaning mavjudligini aniqladilar. Shuningdek, ular Ga_2Gd uchun qattiq eruvchanlikning keng doirasini topdilar. Bayanov va Ganchenko [13] emf usuli bilan Ga_2Gd intermetallik birikmasining hosil bo'lish entalpiyalari va entropiyasini aniqladilar. Meshel va Kleppa [14] $1373 \pm 2 K$ da kalorimetrik o'lchovlari asosida bir xil birikmaning standart hosil bo'lish entalpiyasini o'lchadi va $-72,8 \pm 2,8 KJ/mol$ atom qiymatini topdi. Miedema barcha birikmalarning hosil bo'lish entalpiyasini o'z modeli bo'yicha bashorat qildi [15].

Metodologiya. Ga_2Gd birikmasini o'rganishda olib borilgan zamonaviy tadqiqotlardan biri sifatida M. AiT Boukideur, N. Selhaoui, F.Z. Chrifi Alaoui, A. Iddaoudi va K. Achgar tomonidan bajarilgan ilmiy ish alohida e'tiborga loyiqdir. Mualliflar Marokashdagi Ibn Zohr universitetining Termodinamika va energetika laboratoriyasida faoliyat yuritib, metall tizimlarning termodinamik modellashtirishiga ixtisoslashgan. Ularning tadqiqotlari asosan CALPHAD metodologiyasi asosida murakkab qotishmalar va intermetall tizimlarning fazaviy muvozanatini aniqlashga qaratilgan. [16] Mazkur ishda mualliflar Ga-Gd ikkilik tizimini chuqur tahlil qilib, uning fazaviy diagrammasi va termodinamik xossalarni optimallashtirishga erishganlar. Xususan, ular suyuq fazani tavsiflashda assotsiativ eritma modelidan, qattiq eritmalar uchun esa

Redlich–Kister tenglamalaridan foydalanib, yuqori aniqlikdagi natijalarni qoʻlga kiritganlar. Ushbu yondashuv tizimdagi intermetall fazalarning barqarorligini va ularning energetik parametrlarini ishonchli baholash imkonini beradi. Soʻnggi yillarda fazaviy muvozanat va termodinamik xossalarni aniqlashda CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) metodologiyasi keng qoʻllanilmoqda. Ushbu yondashuv eksperimental maʼlumotlar asosida Gibbs erkin energiyasini modellashtirish orqali murakkab tizimlarning fazaviy diagrammalarini aniqlash imkonini beradi.

Shu bois, mazkur ishning maqsadi Ga-Gd ikkilik tizimining fazaviy muvozanati va termodinamik xossalarni zamonaviy modellashtirish usullari asosida tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot doirasida mavjud eksperimental maʼlumotlar umumlashtirilib, turli fazalar uchun Gibbs erkin energiyasi funksiyalari aniqlanadi hamda tizimning fazaviy diagrammasi qayta hisoblab chiqiladi. Mazkur tadqiqot natijalari Ga-Gd tizimi asosidagi yangi funksional materiallarni yaratishda, xususan magnit va yarimoʻtkazgich qurilmalar ishlab chiqishda muhim ilmiy asos boʻlib xizmat qiladi.

Natijalari va muhokamalar. Hisoblash natijalariga koʻra, Ga-Gd tizimida beshta asosiy intermetall faza: Ga_6Gd , Ga_2Gd , $GaGd$, Ga_2Gd_3 va Ga_3Gd_5 mavjud boʻlib, ularning shakllanishi harorat va konsentratsiyaga bogʻliq holda amalga oshadi. Ushbu fazalar orasida Ga_2Gd birikmasi alohida ahamiyatga ega boʻlib, u keng gomogenlik sohasi bilan tavsiflanadi. Bu esa uning kristall panjarasida komponentlarning oʻzaro almashinish imkoniyati mavjudligini koʻrsatadi. Ga_2Gd fazasining barqarorligi uning Gibbs erkin energiyasining boshqa fazalarga nisbatan past qiymatga ega boʻlishi bilan izohlanadi. Bu holat ushbu birikmaning termodinamik jihatdan qulay hosil boʻlishini taʼminlaydi va uni tizimning markaziy fazalaridan biriga aylantiradi.

Ga-Gd tizimidagi intermetall fazalar

1-jadval

Fazalar	Tarkib (at.% Gd)	Kristall tuzilish	Magnit xossa
Ga_6Gd	~14	Tetragonal	Paramagnit
Ga_2Gd	22–33	Geksagonal	Zaif ferromagnit
$GaGd$	50	Ortorombik	Ferromagnit
Ga_2Gd_3	60	Tetragonal	Antiferromagnit
Ga_3Gd_5	62.5	Tetragonal	Antiferromagnit

Ga_2Gd intermetall birikmasining kristall tuzilmasi geksagonal tizimga mansub boʻlib, u yuqori darajadagi fazaviy simmetriyaga ega. Kristall panjaraning asosiy geometrik parametrlari 2-jadvalda keltirilgan.

Ga_2Gd kristall panjara parametrlari.

2-jadval

Parametr	Qiymat
a (Å)	4.20
b (Å)	4.20
c (Å)	4.18
α (°)	90
β (°)	90
γ (°)	120
Hajm V (Å ³)	63.80

$a = b \neq c$ va $\gamma = 120^\circ$ boʻlishi kristallning **geksagonal simmetriyaga** ega ekanligini tasdiqlaydi. Bu turdagi panjaralarda atomlar odatda qatlamli struktura hosil qilib joylashadi, bu esa materialning anisotrop fizik xossalari sabab boʻladi. Hajm qiymati (63.80 Å³) kristall panjaraning nisbatan kompakt tuzilganini koʻrsatadi, bu esa atomlar orasidagi oʻzaro taʼsir kuchlarining yuqoriligini bildiradi.

Atomlarning fractional koordinatalari.

3-jadval

Wyckoff	Element	x	y	z
1a	Gd	0	0	0
2d	Ga	2/3	1/3	1/2

Tadqiqot natijalariga koʻra, Ga_2Gd kristallida atomlarning fazaviy joylashuvi Wyckoff pozitsiyalar orqali aniqlandi. Ushbu joylashuvlar 3-jadvalda keltirilgan.

Natijalardan ko'rinib turibdiki: Gd atomlari (0,0,0) koordinatada, ya'ni kristall panjaraning eng yuqori simmetrik nuqtasida joylashgan; Ga atomlari esa (2/3, 1/3, 1/2) koordinatalarda joylashib, qatlamli struktura hosil qiladi. 2d pozitsiya simmetriyaga ega bo'lgani sababli, Ga atomlari fazoda ikki ekvivalent nuqtani egallaydi. Natijada bitta elementar hujayrada jami 3 ta atom mavjud bo'ladi. Bu joylashuv kristallning barqarorligini ta'minlab, elektron va magnit xossalarning shakllanishida muhim rol o'ynaydi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, Ga₂Gd intermetall birikmasi geksagonal kristall tizimga mansub bo'lib, yuqori darajadagi fazoviy simmetriya va barqaror atom joylashuviga ega. Atomlarning Wyckoff pozitsiyalarda joylashuvi va panjara parametrlarining optimal qiymatlari materialning yuqori zichligi, barqarorligi hamda anizotrop fizik xossalarni ta'minlaydi. Ayniqsa, gadoliniiy atomlarining mavjudligi magnit xossalarning kuchli namoyon bo'lishiga sabab bo'ladi.

Xulosa. Mazkur tadqiqot natijalari Ga-Gd ikkilik tizimida hosil bo'ladigan Ga₂Gd intermetall birikmasining muhim fizik va termodinamik xususiyatlarini aniqlash imkonini berdi. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, ushbu birikma geksagonal kristall tizimga mansub bo'lib, yuqori fazoviy simmetriya va barqaror atom joylashuvi bilan tavsiflanadi. Kristall panjara parametrlarining optimal qiymatlari hamda atomlarning Wyckoff pozitsiyalarda joylashuvi materialning strukturaviy mustahkamligini va anizotrop xossalarni ta'minlaydi. CALPHAD metodologiyasi asosida olib borilgan hisoblashlar Ga₂Gd fazasining tizimdagi boshqa intermetall birikmalarga nisbatan past Gibbs erkin energiyaga ega ekanligini ko'rsatdi. Bu esa uning termodinamik jihatdan barqaror faza ekanligini tasdiqlaydi. Shuningdek, ushbu fazaning keng gomogenlik sohasi kristall panjarada komponentlarning o'zaro almashinish imkoniyatini ko'rsatib, materialning fizik xossalarni boshqarish imkonini yaratadi.

Elektron tuzilish nuqtayi nazaridan, galliiy atomlarining p-elektronlari va gadoliniiy atomlarining f-elektronlari o'rtasidagi o'zaro ta'sir natijasida murakkab elektron zichlik taqsimoti yuzaga keladi. Bu holat materialda metallik o'tkazuvchanlik, magnit tartiblanish va optik faollikning shakllanishiga olib keladi. Ayniqsa, gadoliniiyning mavjudligi tufayli magnit xossalarning namoyon bo'lishi Ga₂Gd birikmasini magnit funksional material sifatida ajratib turadi. Umuman olganda, Ga₂Gd intermetall birikmasi yuqori barqarorlik, moslashuvchan elektron tuzilish va sezilarli magnit xossalarga ega istiqbolli material hisoblanadi. Ushbu natijalar kelajakda spintronika, magnitooptik qurilmalar va yuqori samarali yarimo'tkazgich texnologiyalarini rivojlantirishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. Scerri, Eric (2020). *Davriy jadval: uning tarixi va ahamiyati*. Oxford University Press. 149-bet. ISBN 978-0-19-091436-3.
2. Mindat.org saytida konkoidal sinish
3. Tsai, W. L.; Hwu, Y.; Chen, CH; Chang, LW; Je, JH; Lin, HM; Margaritondo, G. (2003). "Don chegaralarini tasvirlash, galliiy diffuziyasi va Al-Zn qotishmasining sinish xususiyati - joyida o'rganish". *Fizika tadqiqotlarida yadro asboblari va usullari B bo'limi*. 199: 457–463. Bibcode : 2003NIMPB.199..457T. doi : 10.1016/S0168-583X(02)01533-1.
4. Vigilante, GN; Trolano, E.; Mossey, C. (1999-yil iyun). "Indiy va Galliiy yordamida ASTM A723 qurol po'latining suyuq metall bilan qobig'i". *Mudofaa texnik axborot markazi*. 2009-yil 7-iyulda olingan
5. By Arònel123 - Own work, CC BY 4.0,
6. By Jurii - <http://images-of-elements.com/gadolinium.php>, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6840240>
7. M. Degrez, *Mémoire de Fin d'Etudes*, 2011.
8. L. Kaufman, H. Bernstein, *Computer Calculations of Phase Diagrams*, Academic Press, New York, NY, 1970.
9. K.H.J. Buschow et al., *J. Less-Common Metals* 45 (1976) 309–313.
10. S.P. Yatsenko et al., *J Less-Common Met.* 64 (1979) 185–199.
11. S.P. Yatsenko et al., *Met.* 2 (1972) 312.
12. Joshua Pelleg, L. Zevin, *J. Less-Common Metals* 77 (1981) 197–203.
13. Bayanov et al., *J. Phys. Chem.* 49 (1975) 801.
14. Meschel et al., *J. Alloys Comp.* 319 (2001) 204.
15. A. Debski et al., *Archiv. Metall. Mater.* 59 (2014) 1337–1343.
16. M. AiT Boukideur, N. Selhaoui, F.Z. Chrifi Alaoui, A. Iddaoudi, K. Achgar, *Thermodynamic modeling of the Ga-Gd binary system*, *Materials Today: Proceedings*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.598>

TEMIR ASOSIDAGI AMORF QOTISHMALARNING ISSIQLIK XOSSALARI

Husenov Rashid Komil o'g'li,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti

Muhandislik fizikasi institutining bosqich talabasi

rashidhusenov084@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada temir asosidagi amorf qotishmalarning o'ziga xos issiqlik xossalari va ularning ichki tuzilishi bilan bog'liqligi ko'rib chiqiladi. Kristall qotishmalardan farqli o'laroq, amorf materiallardagi atomlarning tartibsiz joylashuvi ("muzlab qolgan suyuqlik") issiqlik o'tkazuvchanligi, issiqlik sig'imi va termik kengayish kabi ko'rsatkichlarga qanday ta'sir qilishi tahlil qilingan. Shuningdek,

maqolada shisha hosil bo'lishi (T_g) va kristallanishi (T_c) haroratlarining amaliy ahamiyati, materialning barqarorlik chegaralari hamda sanoatda (xususan, transformatorlar va himoya qoplamalarida) qo'llanilishidagi afzallik va cheklovlar yoritilgan.

Kalit so'zlar: temir asosidagi amorf qotishmalar, tartibsiz atom tuzilishi, issiqlik o'tkazuvchanligi, issiqlik sig'imi, kristallanish harorati (T_c), shisha hosil bo'lish harorati (T_g), termik kengayish, transformator lentalar.

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА АМОΡФНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Аннотация. В данной статье рассматриваются специфические тепловые свойства аморфных сплавов на основе железа и их связь с внутренней структурой. В отличие от кристаллических сплавов, анализируется влияние неупорядоченного расположения атомов в аморфных материалах («застывшей жидкости») на такие параметры, как теплопроводность, теплоемкость и термическое расширение. В статье также обсуждается практическое значение температур стеклования (T_g) и кристаллизации (T_c), пределы стабильности материала, а также преимущества и ограничения его применения в промышленности (в частности, в трансформаторах и защитных покрытиях).

Ключевые слова: Аморфные сплавы на основе железа, неупорядоченная атомная структура, теплопроводность, теплоемкость, температура кристаллизации (T_c), температура стеклования (T_g), термическое расширение, трансформаторные ленты.

THERMAL PROPERTIES OF IRON-BASED AMORPHOUS ALLOYS

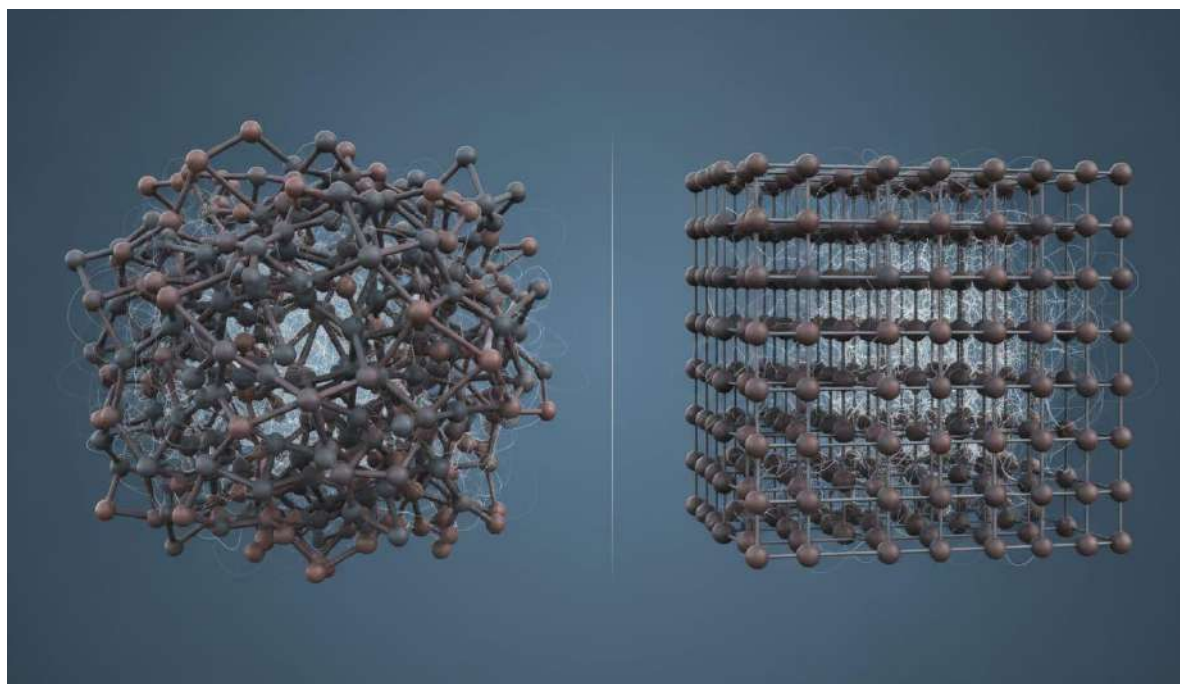
Abstract. This article examines the specific thermal properties of iron-based amorphous alloys and their relationship to their internal structure. In contrast to crystalline alloys, the effect of the disordered arrangement of atoms in amorphous materials ("frozen liquid") on such parameters as thermal conductivity, heat capacity, and thermal expansion is analyzed. The article also discusses the practical significance of the glass transition (T_g) and crystallization (T_c) temperatures, the stability limits of the material, and the advantages and limitations of their application in industry (in particular, in transformers and protective coatings).

Keywords: Iron-based amorphous alloys, disordered atomic structure, thermal conductivity, heat capacity, crystallization temperature (T_c), glass transition temperature (T_g), thermal expansion, transformer tapes.

Kirish. Zamonaviy materialshunoslikda temir asosidagi amorf qotishmalar o'zining noodatiy xossalari bilan oddiy kristall qotishmalardan (masalan, po'latdan) keskin ajralib turadi. Buning asosiy sababi ularning ichki tuzilishida bo'lib, atomlar muntazam panjara hosil qilmasdan, tartibsiz joylashgan bo'ladi. Bunday

tuzilma fanda ko'pincha "muzlab qolgan suyuqlik" deb ta'riflanadi. Amorf qotishmalarning issiqlikni o'tkazishi, qizish jarayonida o'z holatini saqlashi va ma'lum bir harorat chegarasidan keyin kristallanib ketishi ularni amaliyotda qo'llashda hal qiluvchi ahamiyatga ega. Kristall materiallarda issiqlik to'liqlari "to'g'ri chiziq" bo'ylab harakat qilsa, amorf tuzilmada bu yo'l notekis va chalkash bo'ladi, natijada issiqlik o'tkazuvchanligi pasayadi. Ushbu maqolada amorf tuzilmaning issiqlik xususiyatlariga ta'siri, materialning qizdirilganda barqarorligini yo'qotish mexanizmlari va sanoatda xavfsiz ishlash uchun zarur bo'lgan issiqlik ko'rsatkichlari batafsil tahlil qilinadi. "Nega ayrim metall qotishmalar qiziganda odatdagi po'lat kabi tutmaydi?" degan savolni ko'rib chiqamiz. Buning sababi ko'pincha ichki tuzilishda bo'ladi. Temir asosidagi amorf qotishmalar atomlari tartibli panjara hosil qilmaydi, shu bois ular oddiy kristall qotishmalardan ancha farq qiladi.

Asosiy qism. Amorf qotishma, sodda aytganda, ichki tuzilishi "muzlab qolgan suyuqlik"ka o'xshash metall materialdir. Uning issiqlikni o'tkazishi, qizishda holatini saqlashi va ma'lum haroratdan keyin kristallanib ketishi amaliy ishda katta ahamiyatga ega. Quyida aynan shu savollarga aniq javob topasiz. Amorf tuzilma issiqlik xossalarga qanday ta'sir qiladi. Temir asosidagi amorf qotishmalarda atomlar muntazam tartibda joylashmaydi. Shu sabab issiqlik oqimi material ichida kristall qotishmadagidek erkin yurmaydi. Kristall materialda atomlar "tekis yo'l" hosil qiladi, amorf materialda esa bu yo'l notekis bo'ladi. Natijada issiqlik o'tkazuvchanligi ko'pincha pastroq chiqadi. Bu tartibsizlik faqat issiqlik o'tishiga emas, balki issiqlik sig'imiga ham ta'sir qiladi. Material qiziganda atomlar turli yo'nalishda tebranadi. Shuning uchun berilgan issiqlikning bir qismi ichki qayta taqsimlanishga ketadi. Demak, qizish jarayoni ba'zan silliqroq kechadi. Yana bir muhim jihat bor. Amorf qotishma harorat oshgani sari ichki barqarorligini yo'qota boshlashi mumkin. Avval yumshashga yaqin holat kuzatiladi, keyin esa ma'lum chegaradan o'tsa, kristallanish boshlanadi. Shu paytdan boshlab issiqlik va mexanik xossalari ham o'zgaradi.



a) amorf tuzilma

b) kristall tuzilma

(1-rasm)

Qisqacha xulosa shundaki, amorf tuzilma issiqlikning o'tish yo'lini chalkashtiradi, shu bilan materialning xulqini o'zgartiradi. Tartibsiz atom tuzilishi issiqlik o'tkazuvchanligini nega pasaytiradi. Issiqlik qattiq jism ichida ko'pincha atom tebranishlari orqali tarqaladi. Buni juda sodda qilib, "issiqlik to'liqini" deb tasavvur qilish mumkin. Kristall panjarada bu to'liq nisbatan tekis harakat qiladi. Amorf tuzilmada esa u ko'p joyda "urilib", yo'nalishini yo'qotadi. Masalan, silliq yo'lda velosiped tez yuradi. Toshli va notekis yo'lda esa tezlik tushadi. Issiqlik oqimi ham shunga o'xshaydi. Temir asosidagi amorf qotishmada ichki yo'l tekis emas, shu sabab issiqlikning tarqalishi sekinlashadi. Bu xossa ayrim qurilmalarda foydali. Chunki issiqlik birdan tarqalib ketmaydi. Ammo ayrim detallda bu cheklov ham bo'lishi mumkin, chunki ortiqcha qizish mahalliy joyda yig'ilib qoladi. Shisha hosil bo'lish harorati va kristallanish harorati nimani bildiradi. Amorf qotishmalar uchun ikki tushuncha ko'p uchraydi, T_g va T_x . T_g , ya'ni shisha hosil bo'lish harorati,

materialning qattiq va nisbatan mo'rt holatdan yumshoqroq holatga yaqinlashishini bildiradi. Bu hali erish emas, balki ichki harakatchanlikning ortishi. T_x esa kristallanish harorati. Shu nuqtaga yaqinlashganda atomlar tartibsiz holatdan tartibli holatga o'ta boshlaydi. Boshqacha aytganda, material o'zining amorf tabiatini yo'qotadi. T_g bilan T_x oralig'i qanchalik qulay bo'lsa, issiqlik barqarorligi shunchalik yaxshi bo'ladi. Chunki material ma'lum ish haroratida o'z xossalarini saqlab turadi. Amaliyotda aynan shu oralig'ni bilish xavfsiz ishlash uchun kerak.

Temir asosidagi amorf qotishmalarda eng muhim issiqlik ko'rsatkichlari. Temir asosidagi amorf qotishmalarni tanlashda bir nechta issiqlik ko'rsatkichlari asosiy rol o'ynaydi. Birinchi ko'rsatkich, issiqlik sig'imi. U materialni ma'lum darajada qizdirish uchun qancha issiqlik kerakligini anglatadi. Bu detalning tez yoki sekin qizishini tushunishga yordam beradi. Ikkinchi ko'rsatkich, issiqlik o'tkazuvchanligi. U issiqlikning material bo'ylab tarqalish tezligini bildiradi. Agar bu qiymat past bo'lsa, issiqlik bir joyda ko'proq ushlanib qoladi. Shu sabab konstruksiyada issiqlik tarqalishini oldindan hisoblash kerak bo'ladi. Uchinchi ko'rsatkich, termik kengayish. Harorat oshganda o'lcham o'zgaradi. Agar bu o'zgarish nazorat qilinmasa, yupqa lenta, qoplama yoki birlashtirilgan detalda zo'riqish paydo bo'ladi. Keyin yoriq yoki shakl buzilishi chiqishi mumkin. To'rtinchi jihat, kristallanishga moyillik. Amorf qotishma qizdirilganda ma'lum nuqtadan keyin o'z tuzilishini o'zgartirishi mumkin. Bu faqat nazariy gap emas. Chunki shu o'zgarishdan keyin magnit, mexanik va issiqlik xossalari ham yangilanadi. Nihoyat, qizdirilganda xossalarning vaqt bo'yicha o'zgarishi ham muhim. Ba'zi holatda material birdan emas, asta o'zgaradi. Shu sabab qisqa qizdirish bilan uzoq qizdirish bir xil natija bermaydi.



(2-rasm)

Issiqlik sig'imi va termik kengayish amalda nimani anglatadi:

Agar materialning issiqlik sig'imi mos bo'lsa, detal keskin qizib ketmaydi. Bu, ayniqsa, yupqa lenta va qoplamalarda foydali. Chunki harorat bir zumda sakrasa, ichki zo'riqish ortadi. Termik kengayish ham oddiy ko'rsatkich emas. Masalan, metall qoplama asos sirtga mahkam yopishtirilgan bo'lsa, qiziganda ikkalasi turlicha kengayishi mumkin. Shu holda qoplama ko'chishi yoki yorilishi ehtimoli bor. Detail tanlashda aynan shu moslik tekshiriladi.

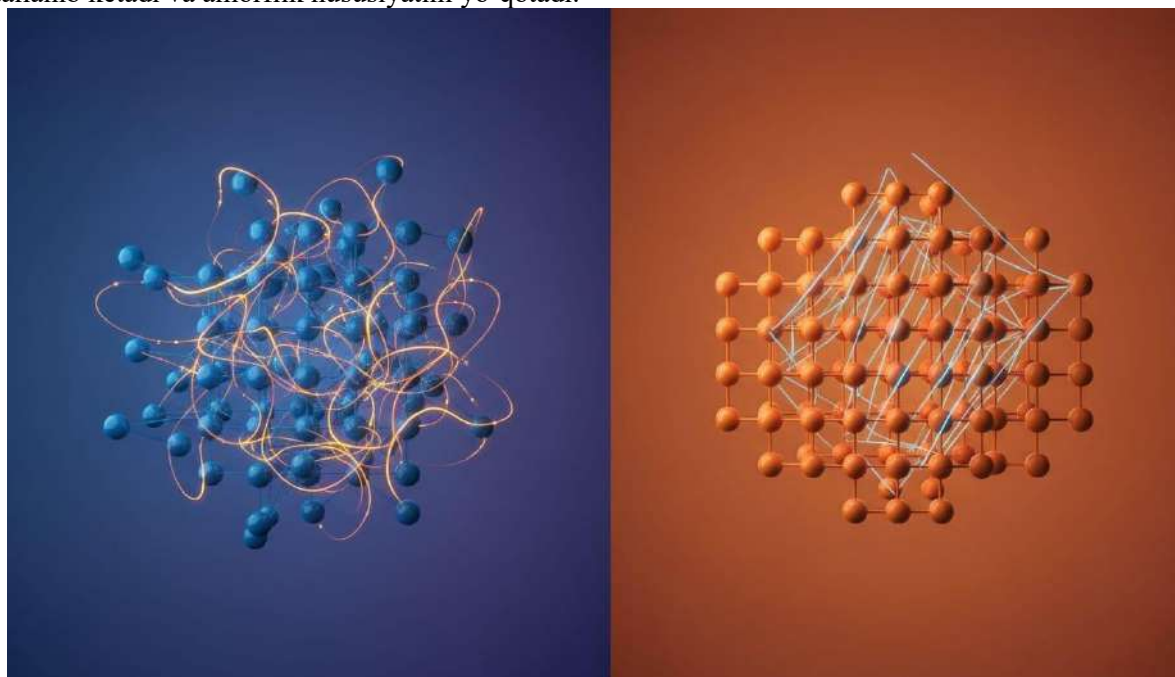
Qizdirilganda amorf holatdan kristall holatga o'tish xavfi:

Harorat me'yoridan oshsa, amorf qotishma o'zining eng asosiy xossalarini yo'qotishi mumkin. Chunki ichki tartibsizlik kamayib, kristall donalar paydo bo'la boshlaydi. Natijada issiqlik o'tkazuvchanligi, qattqlik va boshqa ko'rsatkichlar o'zgaradi. Bu xavfni ishlab chiqarishda ham, xizmat paytida ham hisobga olish kerak. Ba'zan bunday o'zgarish DSC usuli bilan kuzatiladi, lekin amaliy qaror uchun asosiysi harorat chegarasini to'g'ri belgilashdir. Bir marta noto'g'ri qizdirilgan materialni avvalgi holatga qaytarish oson emas.

Bu issiqlik xossalari qayerda foyda beradi va nimalarga e'tibor berish kerak:

Temir asosidagi amorf qotishmalar transformator lentalarida keng ishlatiladi. Bunga sabab faqat magnit xossa emas. Balki qizishda o'zini qanday tutishi ham muhim. Agar material ish haroratida barqaror qolsa, qurilma uzoqroq xizmat qiladi. Sensor qismlarida ham shu xossa kerak bo'ladi. Chunki kichik detalda issiqlik tarqalishi boshqacha kechadi. Himoya qoplamalarida esa pastroq issiqlik o'tkazuvchanligi ba'zi joylarda foyda beradi. U sirtni issiqlik zarbasidan qisman himoya qiladi. Ammo foyda bilan birga cheklov ham bor.

Ishlab chiqarish murakkab bo'lishi mumkin, chunki amorf holatni saqlash uchun tez sovutish talab etiladi. Qalin kesimlarda buni ushlash qiyinroq. Bundan tashqari, ishchi harorati noto'g'ri tanlansa, material asta kristallanib ketadi va amorflik hususiyatini yo'qotadi.



(3-rasm)

Sanoatda qo'llanishi, afzallik va cheklovlar bir joyda. Sanoatda bu qotishmalar, avvalo, yupqa lentalar va maxsus qoplamalarda qulay. Chunki ular bir xil tarkib va nazoratli issiqlik ishlovi bilan barqaror natija beradi. Ayrim holatda pastroq issiqlik o'tkazuvchanligi ham foyda keltiradi. Afzalligi shundaki, material maxsus ishlovga yaxshi moslashadi. Ammo ishlab chiqarish jarayoni oddiy po'latnikidan qiyinroq. Qalin detalda amorf holatni saqlash mushkul. Eng katta xavf esa yuqori haroratda kristallanishdir. Shu sabab tanlovda faqat tarkibga emas, ish haroratiga ham qaraladi.

Xulosa. Temir asosidagi amorf qotishmalarning asosiy farqi, ularning tartibsiz ichki tuzilmasidadir. Ana shu tuzilma issiqlik xossalarini bevosita belgilaydi, ya'ni issiqlik sig'imi, o'tkazuvchanlik, kengayish va kristallanishga moyillikni boshqaradi. Material tanlashda faqat "qattiq" yoki "mustahkam" degan baho yetmaydi. Ish harorati oralig'ini to'g'ri bilish kerak. Shunda amorf qotishma o'z afzalligini ko'rsatadi, aks holda uning eng yaxshi xossalari qizish bilan yo'qoladi.

ADABIYOTLAR:

1. Kissinger, H. E. (1957). "Differensial termal tahlilda eng yuqori haroratning isitish tezligi bilan o'zgarishi". *Analitik kimyo*, 29(11), 1702-1706.
2. Johnson, W. A., & Mehl, R. F. (1939). "Yadro hosil bo'lish va o'sish jarayonlarida reaksiya kinetikasi". *Trans. AIMME*, 135, 416-442.
3. Libermann, H. H. (1983). "Fe asosidagi amorf qotishmalarning kristallanishi". *Materialshunoslik jurnali*, 18(1), 143-152.
4. Inoue, A., & Gook, J. S. (1995). "Keng super sovutilgan suyuqlik mintaqasiga ega Fe asosidagi yumshoq magnit qotishmalar". *Materials Transactions, JIM*, 36(9), 1180-1183.
5. Ranganathan, S., & von Heimendahl, M. (1981). "Metall oynalarni kristallashtirish usullarining uchta toifasi". *Materialshunoslik jurnali*, 16(9), 2401-2404.

NEYTRON QAMRASH TERAPIYASIDA DOZA TAQSIMOTINI GEANT4 YORDAMIDA MODELLASHTIRISH

Himmatov Islombek Fazliddin o‘g‘li,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti o‘qituvchisi, PhD
islombekhimmatov24@gmail.com

Eshburiyev Rashid,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti professori
eshburiyev0082@gmail.com

Mamatqulov Orifjon Bahromovich,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti dotsenti
orifjon.m1974@gmail.com

Bahriddinov Bobosher Alisher o‘g‘li,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti magistranti
bobosherbahriddinov@gmail.com

Umarov Zohidjon Bahriddin o‘g‘li,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti magistranti
Samarqand, O‘zbekiston
umarovzohid931@gmail.com

Annotatsiya. Bor neytron qamrash terapiyasi (BNQT) – bu saraton hujayralarini tanlab yo‘q qilishga asoslangan ikki komponentli zamonaviy radiatsion davolash usuli. Ushbu ishda Geant4 Monte-Karlo dasturiy ta‘minoti yordamida sog‘lom va o‘simta to‘qimalarida hosil bo‘ladigan doza taqsimoti modellash tirildi. Tajriba natijalari fantom va o‘simta modellarida bor-10, azot va neytron dozalarining chuqurlik bo‘yicha o‘zgarishini ko‘rsatdi. Maqolada BNQT ning dolzarbligi, mavjud muammolar va ^{10}B konsentratsiyasini optimallashtirishning klinik ahamiyati muhokama qilindi.

Kalit so‘zlar: neytron qamrash terapiyasi, BNQT, bor-10, Geant4, dozimetriya, doza komponentlari

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ В НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GEANT4

Аннотация. Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) – это современный метод радиотерапии, основанный на избирательном уничтожении раковых клеток. В данной работе в среде программного обеспечения Geant4 методом Монте-Карло смоделировано распределение дозы в здоровых и опухолевых тканях. Результаты показали изменение доз бор-10, азота и нейтронов по глубине в фантоме и модели опухоли. В статье обсуждаются актуальность БНЗТ, существующие проблемы и клиническая значимость оптимизации концентрации ^{10}B .

Ключевые слова: бор-нейтронозахватная терапия, БНЗТ, бор-10, Geant4, дозиметрия, компоненты дозы

MODELING DOSE DISTRIBUTION IN NEUTRON CAPTURE THERAPY USING GEANT4

Abstract. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is a modern radiation treatment method based on the selective destruction of cancer cells. In this work, dose distribution in healthy and tumor tissues was simulated using the Geant4 Monte Carlo software toolkit. The results showed the depth-dependent variation of boron-10, nitrogen, and neutron doses in a phantom and a tumor model. The article discusses the relevance of BNCT, existing challenges, and the clinical significance of optimizing boron concentration.

Keywords: boron neutron capture therapy, BNCT, boron-10, Geant4, dosimetry, dose components

Kirish. Bor neytron qamrash terapiyasi (BNQT) – bu ikki komponentli radiatsion davolash usuli bo‘lib, unda bemorga avval ^{10}B izotopi bilan boyitilgan birikma yuboriladi, so‘ngra o‘simta joylashgan hudud past energiyali (issiq yoki epi issiq) neytronlar bilan nurlantiriladi. ^{10}B neytronni qamrab olganda hosil bo‘lgan $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ reaksiyasi natijasida yuqori energiyali alfa zarracha va litiy yadrosi ajralib chiqadi.

Ushbu reaksiya mahsulotlarining to'qimadagi erkin yugurish masofasi taxminan 5–9 mkm bo'lib, bu bitta hujayra diametriga teng. Shu sababli, bor-10 to'plangan hujayralar selektiv ravishda yo'q qilinadi [1-3].

BNQT ning dolzarbligi quyidagi omillar bilan belgilanadi:

- Jarrohlik o'tkazish qiyin bo'lgan o'simtalar (masalan, glioblastoma, bosh va bo'yin saratonining ba'zi turlari) uchun samarali.

- Bor-10 birikmalarining (masalan, BPA, BSH) o'simta hujayralarida to'planishi tufayli sog'lom to'qimalarning zararlanishi kamayadi.

- Reaktorlar o'rnini egallayotgan tezlatkichlar asosidagi neytron manbalar terapiyani klinik sharoitda keng qo'llash imkonini beradi [4].

Klinik jihatdan BNQT ni keng joriy etishga to'sqinlik qilayotgan asosiy muammolar quyidagilardir:

- Bor konsentratsiyasining notekis taqsimlanishi – bor-10 birikmalari o'simta ichida har doim ham bir tekisda to'planmaydi. O'simtaning markaziy qismida qon tomirlarining siyrakligi tufayli bor-10 konsentratsiyasi past bo'lishi mumkin. Bu esa nurlanish dozasi yetarli bo'lmasligiga olib keladi.

- Sog'lom to'qimalarda bor-10 to'planishi - qon, teri va boshqa normal to'qimalarda ham ma'lum darajada bor-10 saqlanadi. Bu esa neytron bilan nurlantirilishi vaqtida sog'lom to'qimalarning zararlanish xavfini oshiradi.

- Modellashirish va o'lchashdagi noaniqliklar - klinik sharoitda bor-10 konsentratsiyasini real vaqtda aniqlash imkoniyati cheklangan. Shuning uchun modellashirish (masalan, Geant4, MCNP) terapiyani rejalashtirishda muhim rol o'ynaydi, ammo bu modellarning ishonchligi dozimetrik tajribalar bilan tasdiqlanishi kerak.

- Bor-10 birikmalarining selektivligi - mavjud birikmalar (BPA, BSH) hali ideal darajadagi o'simta/sog'lom to'qima nisbatini ta'minlamaydi. Yangi, uchinchi avlod bor-10 birikmalarini yaratish dolzarb ilmiy muammo hisoblanadi [5-8].

Natijalar va ularning tahlili. Ushbu tadqiqotda neytron qamrash terapiyasi Geant4 10.7 dasturiy taminoti muhitida modellashirildi [9]. Tadqiqotda suv ekvivalenti kubik fantom ($10 \times 10 \times 10$ sm, zichligi 1.0 g/sm^3) ishlatildi. O'simta modeli sifatida diametri 3 sm (radiusi 1.5 sm) bo'lgan sferik geometriya tanlandi. Sfera zichligi 1.05 g/cm^3 bo'lib, o'simta to'qimasining fizik xususiyatlarini aks ettiradi. O'simta fantom markazida joylashgan bo'lib, uning markazining fantom yuzasidan chuqurligi 5 sm ni tashkil etadi. Ushbu chuqurlik bosh va bo'yin hududidagi o'simtalarning o'rtacha klinik joylashuviga mos keladi. O'simta materialining elementar tarkibi quyidagicha: vodorod – 10.8%, uglerod – 14.4%, kislorod – 73.8%, azot – 1.0%. Bor-10 konsentratsiyasi 10 dan 50 mg/ml gacha o'zgaruvchan qilib o'rnatildi. Fantom va o'simta issiq va epi issiq neytronlar bilan nurlantirildi.

BNQT da umumiy doza quyidagi komponentlardan tashkil topadi:

$$D_{\text{umumiy}} = D_B + D_N + D_\gamma + D_n$$

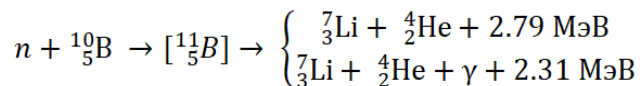
Bu yerda D_B , D_N , D_γ , D_n mos holda bor, azot, gamma va neytronlarning dozasi.

Neytronlarning to'qima (fantom va o'simta) bilan o'zaro ta'siri natijasida bir necha turdagi ikkilamchi zarrachalar hosil bo'ladi. Ushbu zarrachalar va ularning energiyalari dozimetrik hisob-kitoblar uchun asosiy ahamiyatga ega. Quyida har bir reaksiya turi va hosil bo'ladigan zarrachalar batafsil tahlil qilinadi.

1. Bor-10 neytron qamrash reaksiyasi ($^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$)

Bor-10 elementining issiq neytronlarni qamrash reaksiya kesimi 3990 barn. Neytron (n) bor-10 yadrosi tomonidan qamrab olinadi va reaksiya natijasida yuqori energiyali alfa zarracha (α) va litiy-7 (^7Li) yadrosi hosil bo'ladi [10].

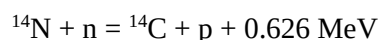
Reaksiya tenglamasi:



2. Azot-14 neytron qamrash reaksiyasi ($^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$)

Azot-14 elementining issiq neytronlarni qamrash reaksiya kesimi 1.7 barn. Neytron azot-14 yadrosi bilan reaksiyaga kirishib, proton va uglerod-14 hosil qiladi.

Reaksiya tenglamasi:



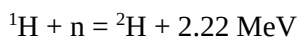
3. Vodorod bilan elastik sochilish ($^1\text{H}(n,n)^1\text{H}$)

Bu reaksiya neytronlarning to'qimada sekinlashuviga sabab bo'ladi. Neytron proton bilan to'qnashishi natijasida energiyasini yo'qotadi.

4. Vodorodda neytron qamrash ($^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$)

Vodorod elementining issiq neytronlarni qamrash reaksiya kesimi 0.33 barn. Issiq neytronlar vodorod yadrosi tomonidan qamrab olinib, 2.22 MeV energiyali gamma nurlanish hosil qiladi.

Reaksiya tenglamasi:



5. Gamma nurlanishi hosil bo'lishi.

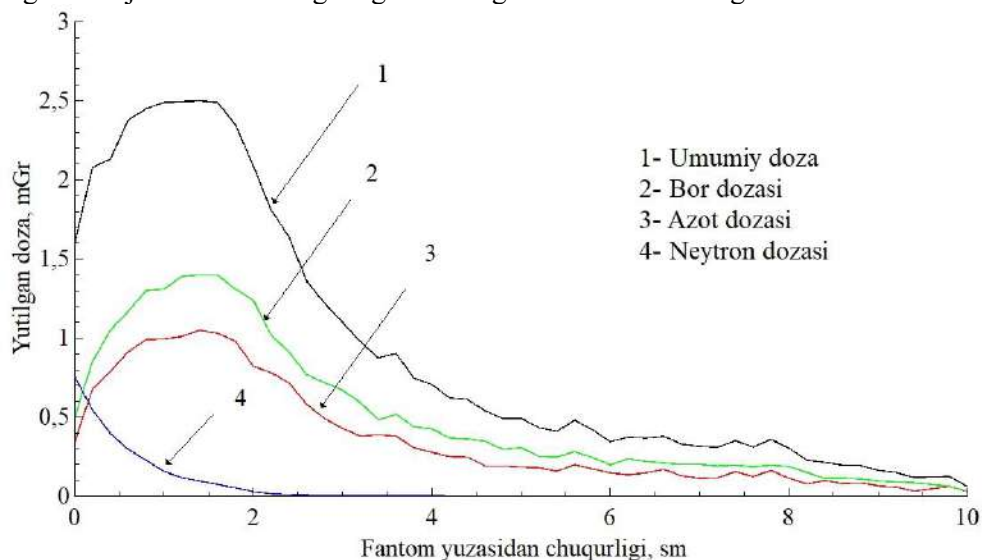
$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaksiyasida hosil bo'lgan gamma kvant (0.478 MeV) va to'qimadagi boshqa gamma manbalari (masalan, vodorodda neytron qamrash - 2.22 MeV gamma) to'qimada kompton sochilishi va fotoeffekt orqali energiyasini elektronlarga beradi.

Jadvalda fantom va o'simta modelini neytronlar oqimi bilan nurlantirilgandagi hosil bo'ladigan reaksiya turlari, hosil bo'lgan zarralarning qaysi turdagi dozaga hissa qo'shishi keltirilgan.

Jadval

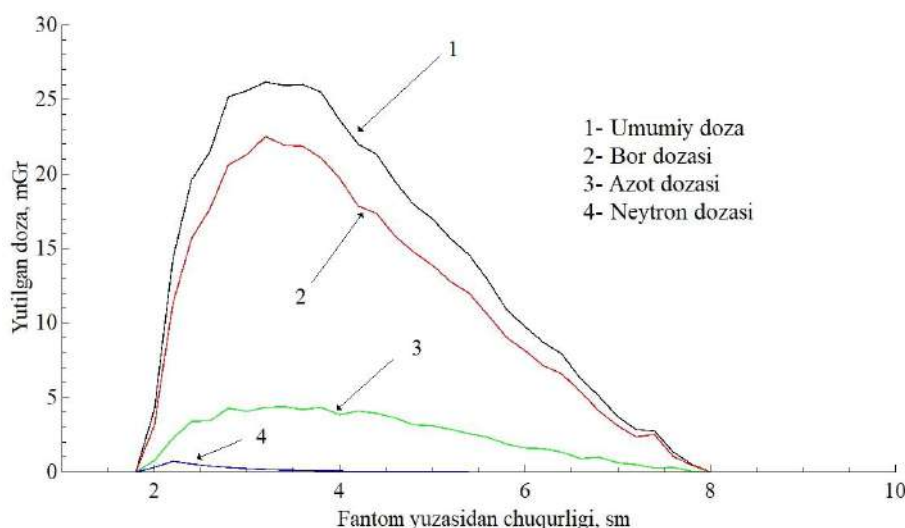
Zarracha turi	Hosil bo'lish reaksiyasi	Energiyasi (MeV)	Modelda kuzatilgan	Dozaga qo'shgan hissasi
Alfa (α)	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	1.47	O'simta, Fantom	Bor dozasi
Litiy-7 (^7Li)	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	0.84	O'simta, Fantom	Bor dozasi
Gamma (γ)	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}^*$	0.478	O'simta, Fantom	Gamma dozasi (kichik)
Gamma (γ)	$^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$	2.22	Fantom	Gamma dozasi
Gamma (γ)	$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}^*$	0.626	Fantom	– (reaksiyada gamma chiqmaydi)
Gamma (γ)	Noelastik sochilish (^{12}C , ^{16}O)	Turli (0.5–7)	Fantom	Gamma dozasi
Proton (p)	$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	0.584	O'simta, Fantom	Azot dozasi
Proton (p)	Elastik sochilish (^1H)	0–0.1	Fantom	Neytron dozasi
Neytron (n)	Elastik sochilish	0–0.5	Fantom, O'simta	Neytron dozasi
Elektron (e^-)	Kompton'cha sochilishi	0–0.5	O'simta, Fantom	Gamma dozasi (elektron orqali)
Deytron (d)	$^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$	~0.001	Fantom	Neytron dozasi (kichik)
Uglerod-14 (^{14}C)	$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$	0.042	Fantom	Azot dozasi (kichik)

1-2 rasmlarda fantom va o'simta modellarida dozalarning chuqurlik bo'yicha taqsimoti keltirilgan. Gamma nurlarning dozasi juda kichik bo'lganligi sababli grafikda ko'rsatilmagan.



1-rasm. Doza komponentlarining fantom yuzasidan chuqurligiga bog'liqligi

1-rasmda fantom yuzasidan chuqurlik oshgan sari umumiy dozaning pasayib borishi kuzatiladi. Eng yuqori doza 0.5 sm chuqurlikda qayd etilgan. Bor dozasi chuqurlik oshishi bilan keskin kamayadi, chunki issiq neytronlar oqimining intensivligi kamayadi.



2-rasm. O'simtada doza komponentlarining masofaga bog'liqligi

O'simta ichida doza taqsimoti bor-10 konsentratsiyasiga bog'liq. 2-rasmda keltirilgan ma'lumotlar (0.5 dan 8.5 sm gacha) o'simta joylashgan chuqurlikda bor dozasi umumiy dozaning 70–80% ini tashkil qilganini ko'rsatadi. Eng yuqori umumiy doza o'simta markazida (4.5 sm chuqurlikda) kuzatilgan – 26 mGy. Bor konsentratsiyasi 30–40 mg/ml oralig'ida bo'lganda bor dozasi yetarli darajada (≥ 20 mGy) ta'minlangan.

Geant4 dasturiy ta'minoti yordamida modellash tirish natijalari shuni ko'rsatdiki:

- Bor konsentratsiyasi 15–20 mg/ml dan past bo'lganda o'simtada terapevtik dozaga erishib bo'lmaydi.

- Konsentratsiya 40 mg/ml dan yuqori bo'lganda sog'lom to'qimalarning nurlanish xavfi ortadi.

- Optimal konsentratsiya oralig'i 25–35 mg/ml ekanligi aniqlandi.

Shuningdek, neytron energiyasini tanlash ham muhim: epi issiq neytronlar (1 eV - 10 keV) chuqur joylashgan o'simtalar uchun qulay, issiq neytronlar esa yuzaki o'simtalarda samarali.

Xulosa. Natijalar shuni ko'rsatadiki, terapevtik samaradorlik va xavfsizlikni ta'minlashda bor konsentratsiyasini 25–35 mg/ml oralig'ida ushlab turish kerak. Azot va neytron dozalari qo'shimcha hissa qo'shsada, asosiy terapevtik ta'sir $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaksiyasi orqali amalga oshadi.

Modellash tirish natijalari BNQT ni rejalashtirishda klinik qarorlarni qo'llab-quvvatlovchi vosita sifatida xizmat qilishi mumkin. Kelgusida turli bor birikmalari, neytron manbalari va o'simta turlari uchun batafsil dozimetrik modellarni ishlab chiqish zarur.

ADABIYOTLAR:

1. Khimmatov, I.F., Ulin, S.E. «Use of a Xenon Gamma Spectrometer for Dosimetry in Boron–Neutron Capture Therapy». *Phys. Atom. Nuclei* **87**, 620–624 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063778824700601>

2. I. F. Khimmatov, S. E. Ulin. Determination of the Dose Load in Neutron Capture Therapy Using a Xenon Gamma-Ray Spectrometer. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2025, Vol. 52, No. 4, pp. 179–184. <https://doi.org/10.3103/S1068335624602097>

3. I.F. Khimmatov, S.E. Ulin, V.M. Grachev, K.F. Vlasik, Z.M. Uteshev, A.E.Shustov, A.I.Madzhidov. Prospects of using a xenon gamma spectrometer in boron neutron capture therapy on the medical beam of the reactor IRT MEPhI. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2025, Vol. 52, No. 9, pp. 72-82. <https://doi.org/10.3103/S1068335625602511>

4. Bikchurina M, Bykov T, Ibrahim I et al. S. Dosimetry for boron neutron capture therapy developed and verified at the accelerator based neutron source VITA // *Front. Nucl. Eng.* - 2023. - T. 2. № October. - pp.1-8.

5. S.Y.Taskaev, V.V.Kanygin. *Boron-neutron capture therapy*. Novosibirsk. SB RAS Publishing House, 2016

6. Таскаев, С. Ю. бор-нейтронозахватная терапия // *Ядерная физика*. – 2021. – Т. 84, № 2. – С. 166-170.

7. Barth R.F., et al. *Boron Neutron Capture Therapy: Current Status and Future Prospects*. Cancer Research, 2022.
8. И.Ф. Химматов, С.Е. Улин. *Определение дозовой нагрузки при нейтрон-захватной терапии с помощью ксенонового гамма-спектрометра*. Краткие сообщения по физике ФИАН, - 2025, - 52, № 4, - стр. 49 - 56.
9. GEANT4 TOOLKIT [Электронный ресурс]: Пакет моделирования взаимодействия частиц с веществом. URL <http://geant4.cern.ch>.
10. Eshbo'riyev R.M. *Yadro reaksiyalari. O'quv qo'llanma*. Samarqand: SamDU nashriyoti, 2025 yil-308 bet.

QO'RG'OSHIN TSIRKONAT-TITANAT KUKUNLARNING ELEKTROFIZIK XOSSALARINI TADQIQ ETISH

Kamilov Sherzod Xashimovich,

O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti, f-m.f.n.

Mirzaraximov Sardor Xabibullayevich,

O'zbekiston Milliy universiteti magistranti

Yunusov Anvar Xolmatovich,

O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti, f-m.f.n.

Abdullayev Raxmatilla Mirsoatovich,

O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti, f-m.f.n.

sardorozmumagistr@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu ishda kompozitsion pyezomateriallar yaratishda istiqbolli xomashyo hisoblangan qo'rg'oshin tsirkonat-titanat (CTS-19) asosidagi segnetokeramika kukunlarining elektrofizik xossalari tadqiq etilgan. Tajriba davomida kukunsimon namunalarning elektr o'tkazuvchanligi (σ) va dielektrik singdiruvchanligi (ϵ) ning tashqi bosim ($P \approx 2,5 \cdot 10^2 \div 2,6 \cdot 10^2$ MPa gacha) hamda o'zgaruvchan elektr maydon chastotasiga ($f=10^2 \div 10^6$ Hz) bog'liqligi o'rganildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, bosim ortishi bilan kukun zarrachalari orasidagi kontakt yuzasining kengayishi hisobiga (σ) va (ϵ) qiymatlari keskin ortadi. Chastotaviy bog'liqlik tahlili $\sigma \propto f^n$ darajali qonuniyatga bo'ysunishini va bu jarayon zarrachalararo potensial to'siqlar hamda ekvivalent elektr sxemadagi sig'im qarshiligi bilan boshqarilishini ko'rsatdi. Aniqlanishicha, kukunsimon namunalarning dielektrik ko'rsatkichlari monolit keramikaga nisbatan past bo'lib, bu zarrachalar yuzasidagi adsorbsion jarayonlar va qo'shimcha potensial to'siqlar hosil bo'lishi bilan izohlanadi. Tadqiqot natijalari pyezoelektrik datchiklar va kompozitsion materiallar ishlab chiqarishda chiqindilardan qayta foydalanish texnologiyalarini takomillashtirishga xizmat qiladi.

Tayanch so'zlar: segnetokeramika, CTS-19, pyezomateriallar, elektr o'tkazuvchanlik, dielektrik singdiruvchanlik, chastota dispersiyasi, potensial to'siq.

INVESTIGATION OF THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF LEAD ZIRCONATE TITANATE POWDERS

Abstract. This study investigates the electrophysical properties of lead zirconate titanate (PZT-19) ferroelectric ceramic powders, which are promising raw materials for composite piezo-materials. The dependence of electrical conductivity (σ) and dielectric permittivity (ϵ) on external pressure (up to $P \approx 2,5 \cdot 10^2 \div 2,6 \cdot 10^2$ MPa) and alternating electric field frequency ($f=10^2 \div 10^6$ Hz) was analyzed. The results demonstrated that an increase in pressure leads to a significant rise in (σ) and (ϵ) due to the expansion of the contact surface between powder particles. Frequency analysis revealed that conductivity follows the power law $\sigma \propto f^n$ explained by inter-particle potential barriers and capacitive resistance within the equivalent circuit. It was found that the dielectric parameters of powdered samples are lower than those of monolithic ceramics, attributed to adsorption processes and additional potential barriers on particle surfaces. These findings contribute to optimizing the recycling of piezoelectric ceramic waste for the production of composite sensors and materials.

Keywords: ferroelectric ceramics, PZT-19, piezomaterials, electrical conductivity, dielectric permittivity, frequency dispersion, potential barrier.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКОВ ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА

Аннотация. В данной работе исследованы электрофизические свойства сегнетокерамических порошков на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС-19), являющихся перспективным сырьем для создания композиционных пьезоматериалов. В ходе эксперимента изучена зависимость электропроводности (σ) и диэлектрической проницаемости (ϵ) порошкообразных образцов от внешнего давления (до $P \approx 2,5 \cdot 10^2 \div 2,6 \cdot 10^2$ МПа) и частоты переменного электрического поля.

($f=10^2\div10^6\text{Гц}$). Результаты показали, что с ростом давления значения (σ) и (ϵ) резко возрастают за счет увеличения площади контактов между частицами порошка. Частотный анализ выявил, что электропроводность подчиняется степенному закону $\sigma \propto f^n$, что объясняется наличием межгранулярных потенциальных барьеров и емкостным сопротивлением в эквивалентной электрической схеме. Установлено, что диэлектрические показатели порошковых образцов ниже, чем у монолитной керамики, что связано с адсорбционными процессами на поверхности частиц и формированием дополнительных барьеров. Полученные данные могут быть использованы для совершенствования технологий переработки отходов пьезокерамики при производстве композиционных датчиков.

Ключевые слова: Сегнетокерамика, ЦТС-19, пьезоматериалы, электропроводность, диэлектрическая проницаемость, зависимость от давления, частотная дисперсия, потенциальный барьер.

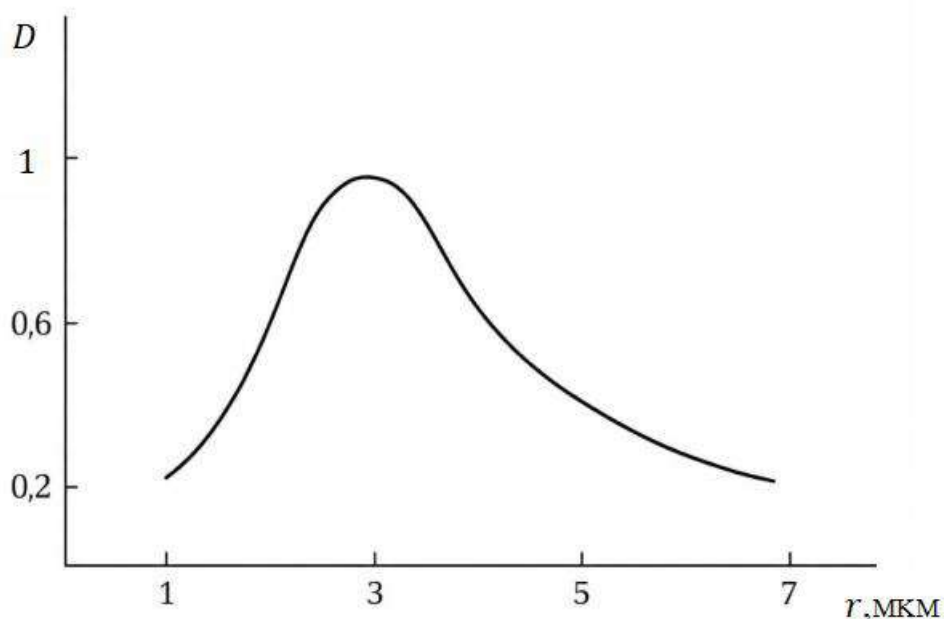
Kirish. Zamonaviy materialshunoslikning ustuvor yo'nalishlaridan biri yuqori samaradorlikka ega, ixcham hamda energiya tejamkor pyeoelektrik qurilmalarni yaratishga qaratilgan. Ushbu kontekstda kompozitsion polimer pyezo-materiallar o'zining yuqori elastikligi, mexanik mustahkamligi va texnologik moslashuvchanligi bilan an'anaviy monolit keramik materiallarga nisbatan sezilarli ustunlik namoyon etadi. Mazkur materiallarga bo'lgan ehtiyojning ortib borishi pyeoelementlar ishlab chiqarish texnologiyalarini takomillashtirish, jarayonlarni soddalashtirish hamda ularning tannarxini kamaytirish zaruratini yuzaga keltirmoqda.

Pyeoelektrik qurilmalar ishlab chiqarish jarayonida hosil bo'ladigan segnetokeramika chiqindilaridan kukun sifatida foydalanish ham iqtisodiy, ham ekologik jihatdan yuqori samaradorlikka ega. Biroq, kukunsimon namunalar (dispers tizimlar) o'zining elektrofizik tabiatiga ko'ra monolit keramikadan tubdan farq qiladi. Kukunli muhitda elektr zaryadlarining ko'chishi (transferi) va qutblanish jarayonlari faqatgina kristall panjara xususiyatlari bilan emas, balki zarrachalararo kontakt yuzasi, donachalar yuzasidagi adsorbsion qatlamlar hamda hosil bo'ladigan potensial to'siqlar bilan belgilanadi. Ayniqsa, bunday tizimlarning tashqi mexanik kuchlanish (bosim) va o'zgaruvchan elektr maydon chastotasiga bo'lgan sezgirligini o'rganish, yangi avlod kompozit datchiklarini loyihalashda o'ta muhimdir.

Mazkur tadqiqotda pyezotexnikada keng qo'llaniladigan, yuqori pyezo-modulga ega qo'rg'oshin tsirkonat-titanat (CTS-19) asosidagi segnetokeramika kukunlari ob'ekt sifatida tanlandi. Ma'lumki, CTS-19 keramikasi murakkab oksidli tizim (Zr, Ti, Pb, Ba) bo'lib, uning kukunsimon holatdagi elektrofizik tabiati hali to'liq tavsiflanmagan. Tadqiqot jarayonida zarralarning taqsimot spektri o'rganilib, bosim ostida o'tkazuvchanlik va dielektrik singdiruvchanlikning o'zgarishi yuqori aniqlikdagi E8-2 ko'prigi va E9-4 kumometri yordamida qayd etildi [1].

Ishning asosiy maqsadi CTS-19 asosidagi kukunsimon tizimlarda elektr o'tkazuvchanlik (σ) va dielektrik singdiruvchanlik (ϵ) parametrlarining bosim (P) hamda chastota (f) bog'liqliklarini aniqlash, shuningdek, zarrachalararo kontaktlarda sodir bo'ladigan relaksatsion jarayonlarning fizik mexanizmlarini ochib berishdan iborat. Bu o'z navbatida, ikkilamchi pyezo-xomashyolar asosida boshqariladigan elektrofizik xossalari intellektual materiallar yaratish imkonini beradi.

Mazkur tadqiqotda qo'rg'oshin tsirkonat-titanat (CTS-19) asosidagi segnetokeramika kukuni asosiy tadqiqot obyekti sifatida tanlandi. Ushbu material o'zining yuqori dielektrik singdiruvchanligi, pyeoelektrik sezgirligi hamda tashqi mexanik ta'sirlarga nisbatan barqaror elektr javobi bilan ajralib turadi. Segnetokeramika kukunining zarracha o'lchamlari bo'yicha taqsimoti granulometrik tahlil asosida aniqlandi (1-rasm). Olingan ma'lumotlar kukun tarkibidagi zarrachalarning mikron diapazonida notekis taqsimlanganligini ko'rsatdi, bu esa materialning elektr va mexanik xossalari sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin [2].



1-rasm. CTS-19 segnetokeramika kukuni zarrachalarining o'lchamlari bo'yicha taqsimlanish diagrammasi

Namunalar uchun solishtirma elektr o'tkazuvchanlik (σ) va dielektrik singdiruvchanlik (ϵ) qiymatlari $f = 10^3$ Hz chastotada turli bosim qiymatlarida o'lchandi. Tajribalar maxsus ishlab chiqilgan kichik o'lchamli doimiy bosim kamerasida olib borildi. Ushbu kamera tashqi mexanik bosimning namuna hajmiga bir tekis taqsimlanishini ta'minlab, materialning elektr parametrlarining bosim ta'sirida o'zgarishini aniq qayd etish imkonini berdi [3].

O'zgaruvchan elektr maydonda elektr parametrlarni aniqlash uchun E8-2 turdagi AC ko'prigi va E9-4 turdagi kummetr asboblardan foydalanildi. Ushbu o'lchov tizimi materialning aktiv va reaktiv elektr xususiyatlarini yuqori aniqlikda aniqlashga imkon berdi. Natijada, mexanik bosim ortishi bilan materialning elektr o'tkazuvchanligi va dielektrik singdiruvchanligida ma'lum qonuniyat asosidagi o'zgarishlar kuzatildi [4].

Ma'lumki, pyezoelektrik keramika murakkab ko'p komponentli oksid tizimidan tashkil topgan bo'lib, uning asosiy tarkibiga qo'rg'oshin (Pb), tsirkoniy (Zr), titan (Ti), bariy (Ba) va boshqa metall oksidlari kiradi. Sinterlash jarayonida hosil bo'lgan polikristall strukturada alohida donachalar bir-biri bilan nozik donalararo ko'priklarchalar orqali bog'lanadi. Elektr o'tkazuvchanlik jarayoni asosan aynan shu ko'priklarchalardagi potentsial to'siqlar va kontakt qarshiliklari bilan belgilanadi.

Keramaning dielektrik va pyezoelektrik xossalari esa kristall donachalar r, MKM elektr domenlar, domen devorlarining harakatchanligi hamda donachalar orasidagi elektr kontaktlarning sifati bilan aniqlanadi. Tashqi bosim ta'sirida domenlarning qayta yo'nalishi va donachalararo masofaning qisqarishi natijasida materialning elektr javobi sezilarli ravishda o'zgaradi. Shu sababli mexanik yuklama segnetokeramika asosidagi sensor va aktuator materiallarining funksional tavsiflarini boshqarishda muhim omil hisoblanadi.

Namunalarining elektr o'tkazuvchanlik qiymati tajribaviy o'lchov natijalari asosida aniqlandi. Solishtirma elektr o'tkazuvchanlik namunaning geometrik o'lchamlari va elektr qarshiligidan foydalanib quyidagi tenglama orqali hisoblandi:

$$\sigma = \frac{I}{RS}$$

bu yerda I - namuna qalinligi, S - elektrod yuzasi va R - o'lchangan elektr qarshilik qiymatini bildiradi. Mazkur ifoda namuna hajmiy elektr xossalarni aniqlash imkonini beradi.

Namunaning dielektrik singdiruvchanligi o'zgaruvchan elektr maydondagi sig'im o'lchovlari asosida hisoblandi va quyidagi munosabat orqali topildi:

$$\epsilon = \frac{Cd}{\epsilon_0 S}$$

bu yerda C - namunaning elektr sig'imi, d - namuna qalinligi, S - elektrod yuzasi, ϵ_0 - vakuumning dielektrik doimiyidir.

CTS-19 asosidagi keramika namunasi uchun atmosfera bosimida o'lchangan boshlang'ich parametrlar quyidagicha aniqlandi:

$$\sigma = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ Om}^{-1} \text{ sm}^{-1} \text{ va } \epsilon = 1700$$

Bu qiymatlar tadqiq qilinayotgan materialning yuqori dielektrik xususiyatga ega ekanligini hamda elektr maydonga nisbatan sezgir ferroelektrik muhit sifatida qaralishi mumkinligini ko'rsatadi. Yuqori dielektrik singdiruvchanlikning mavjudligi material tarkibida dipol momentlarning tashqi maydonga faol javob berishi bilan izohlanadi. Shu bilan birga, nisbatan past elektr o'tkazuvchanlik materialning yaxshi izolyatsion xususiyatlarini saqlab qolishini ko'rsatadi, bu esa uni pyezoelektrik qurilmalar uchun istiqbolli funksional material sifatida tavsiflaydi. Segnetokeramika polikristall tuzilishga ega bo'lib, unda alohida kristall donalar bir-biri bilan tor o'tish sohalari orqali bog'langan [5]. Tashqi bosim ta'sirida ushbu donalararo masofa kamayadi, natijada elektr zaryad tashuvchilar uchun potentsial to'siq balandligi pasayadi. Shu sababli zaryad tashuvchilarning bir donadan ikkinchisiga o'tishi yengillashadi va elektr o'tkazuvchanlik ortadi. Bu bog'lanishni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\sigma(P) = \sigma_0 \exp(\alpha P)$$

bu yerda σ_0 — boshlang'ich elektr o'tkazuvchanlik, P — tashqi bosim, α — bosim sezgirlik koeffitsienti.

O'tkazilgan tajribalar natijasida solishtirma elektr o'tkazuvchanlik (σ) va dielektrik singdiruvchanlik (ϵ) ning tashqi bosimga bog'liqligida ikkita xarakterli soha mavjudligi aniqlandi. Bosimning boshlang'ich qiymatlarida, ya'ni:

$$P \approx 2,5 \cdot 10^2 \div 2,6 \cdot 10^2 \text{ MPa}$$

oralig'igacha, har ikkala parametrlarning keskin ortishi kuzatildi [6]. Ushbu holat kukun zarrachalarining mexanik siqilishi natijasida tizimning umumiy zichlashuvi hamda alohida zarrachalar orasidagi haqiqiy kontakt yuzasining ortishi bilan izohlanadi. Bosim ta'sirida zarrachalar orasidagi bo'shliqlar kamayadi, natijada elektr zaryad tashuvchilar harakati uchun qulayroq yo'llar shakllanadi. Shu sababli kontakt qarshilik kamayib, materialning umumiy elektr o'tkazuvchanligi ortadi.

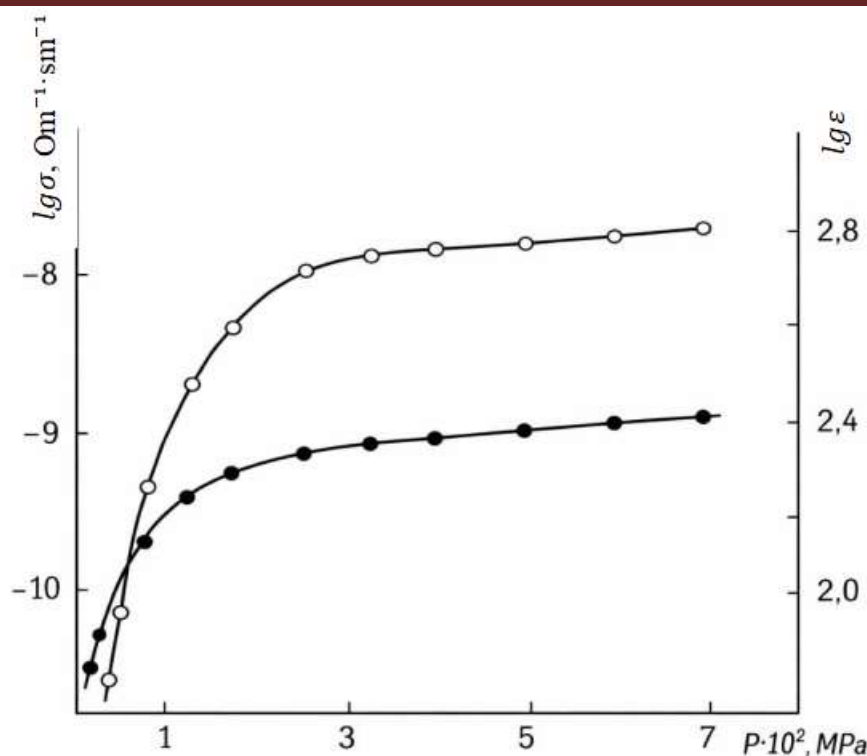
Dielektrik singdiruvchanlikning ortishi esa bosim ta'sirida zarrachalar orasidagi masofa qisqarishi natijasida mahalliy elektr maydonining kuchayishi va qutblanish jarayonining faollashuvi bilan bog'liq. Ayniqsa, bosimning boshlang'ich bosqichida donachalararo kontaktlarning ko'payishi dipol momentlarning tashqi elektr maydonga nisbatan sezgirlikni oshiradi. Bosim qiymati:

$$P > 2,6 \cdot 10^2 \text{ MPa}$$

dan oshgandan so'ng, (σ) va (ϵ) ning bosimga bog'liqligi logarifmik koordinatalarda deyarli to'g'ri chiziqli ko'rinishga ega bo'ldi (2-rasm). Bu esa yuqori bosimlarda tizimda kontaktlar sonining ortishi sekinlashib, elektr parametrlarning o'zgarishi asosan mavjud kontaktlarning ichki xossalari bilan belgilanayotganligini ko'rsatadi [7]. Logarifmik koordinatalardagi chiziqli bog'lanish quyidagicha ifodalanishi mumkin:

$$\log \sigma = aP + b \text{ va } \log \epsilon = cP + d$$

bu yerda a , b , c va d — eksperimental ravishda aniqlangan koeffitsiyentlardir.



2-rasm. CTS-19 asosidagi segnetokeramika kukunsimon namunasi uchun elektr o'tkazuvchanlik (σ) va dielektrik singdiruvchanlik (ϵ) ning bosim (P) ga bog'liqligi: 1 — elektr o'tkazuvchanlik (σ), 2 — dielektrik singdiruvchanlik (ϵ)

Logarifmik koordinatalardagi chiziqli qismlarni atmosfera bosimigacha ekstrapolyatsiya qilish orqali zarrachalararo kontaktlarning ta'sirisiz, ya'ni individual kukun zarrachalarining o'ziga xos elektr parametrlari aniqlandi. Hisoblashlar natijasida kukun holatidagi material uchun quyidagi qiymatlar olindi:

$$\sigma = 7 \cdot 10^{-10} \text{ } \Omega \text{m}^{-1} \text{sm}^{-1} \text{ va } \epsilon = 602$$

Olingan qiymatlar monolit CTS-19 segnetokeramika namunalari nisbatan ancha kichik ekani kuzatildi. Bu farq maydalash jarayonida hosil bo'ladigan sirt hodisalari bilan tushuntiriladi. Ma'lumki, sinterlangan keramika maydalanishi jarayonida yangi hosil bo'lgan zarracha yuzalarida atmosfera bilan o'zaro ta'sir natijasida kislorod ionlari, gidroksil guruhlar (OH^-) hamda boshqa adsorbsiyalangan zarrachalar paydo bo'ladi. Ushbu sirt qatlamlari zarrachalar orasida qo'shimcha potensial to'siqlar vujudga keltiradi [8].

Bundan tashqari, maydalash jarayonida ferroelektrik domen strukturasi qisman buzilishi ham dielektrik singdiruvchanlikning kamayishiga sabab bo'lishi mumkin. Monolit namunada domenlararo o'zaro ta'sir kuchli bo'lsa, kukun holatida alohida zarrachalar elektr jihatdan qisman izolyatsiyalanadi. Shu sababli kukun ko'rinishidagi materialning elektr parametrlari sinterlangan massiv namunaga nisbatan kichikroq bo'ladi.

Ushbu natijalar shuni ko'rsatadiki, CTS-19 asosidagi segnetokeramika kukunlarining elektr xossalari nafaqat kimyoviy tarkibga, balki zarracha sirtining holati va donachalararo kontakt mexanizmlariga ham kuchli darajada bog'liqdir. Bu esa bunday materiallarni bosim sezgir sensorlar yaratishda qo'llashda mikrostrukturani nazorat qilish muhim ekanligini ko'rsatadi [9].

Chastotaga bog'liqlikni o'rganish shuni ko'rsatdiki, $f=10^2 \div 10^6$ Hz oralig'ida (σ) ortib boradi va quyidagi darajali qonunga bo'ysunadi:

$$\sigma \sim f^s$$

Mazkur bog'lanish segnetokeramika kukunlarida elektr o'tkazuvchanlikning klassik omik mexanizmdan tashqari, lokallashtirilgan zaryad tashuvchilarning sakrashli transporti bilan ham bog'liqligini ko'rsatadi. Bunday xatti-harakat ferroelektrik kukunlarda zarrachalararo potensial to'siqlar mavjud bo'lganda kuzatiladi. Bu holat zarrachalar qarshiligi (R), to'siq qarshiligi (r) va sig'imi (C) bo'lgan ekvivalent elektr sxema bilan tushuntiriladi. Chastota ortishi bilan sig'im qarshiligi kamayadi va natijada tizimning umumiy elektr o'tkazuvchanligi ortadi. Bosimning ortishi esa to'siq qarshiligini kamaytirib, (σ) ning oshishiga olib keladi (3-rasm).

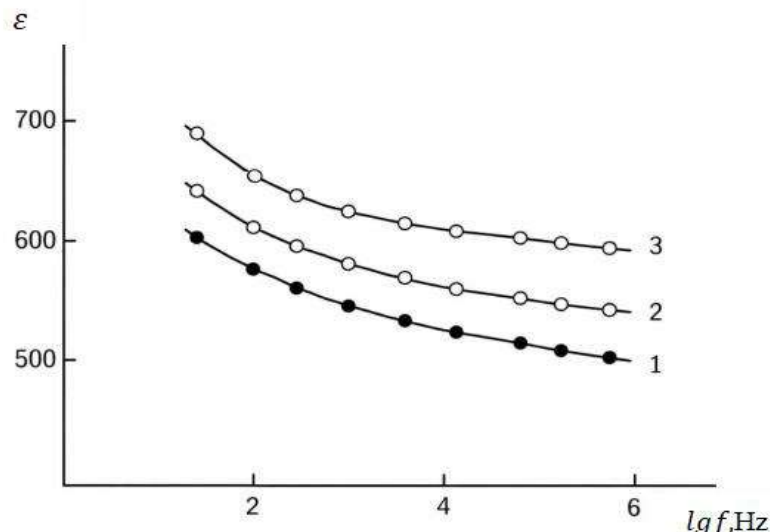
Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, dielektrik singdiruvchanlik (ϵ) chastota ortishi bilan kamayadi. Ayniqsa, $f = 3,2 \cdot 10^3$ dan 10^6 Hz oralig'ida (ϵ) ning ($\lg f$) ga bog'liqligi deyarli chiziqli xarakterga ega bo'ldi. Ushbu bog'lanish quyidagi empirik ifoda bilan tavsiflanishi mumkin:

$$\epsilon = \epsilon_0 - k \lg f$$

bu yerda ϵ_0 — past chastotadagi dielektrik singdiruvchanlik, k — relaksatsiya koeffitsienti.

Chastota ortishi bilan tashqi elektr maydonning yo'nalishi tez almashinadi va dipol momentlar maydon ortidan to'liq ergashishga ulgurmaydi. Natijada qutblanishning ayrim komponentlari susayadi va umumiy dielektrik singdiruvchanlik kamayadi [10].

Bosim ortishi bilan ($\epsilon(\lg f)$) bog'lanishidagi chiziqli qiyaligining kamayishi kuzatildi. Bu holat shuni ko'rsatdiki, mexanik siqilish ta'sirida zarrachalararo kontaktlar mustahkamlanib, relaksatsion qutblanish mexanizmlari qisman cheklanadi. Natijada dielektrik javob chastotaga kamroq sezgir bo'lib qoladi.



3-rasm. CTS-19 segnetokeramika kukunsimon namunasi uchun o'zgaruvchan elektr maydon chastotasiga bog'liq holda dielektrik singdiruvchanlikning o'zgarishi :
1) 3×10^2 MPa, 2) 5×10^2 MPa, 3) 7×10^2 MPa

Shunday qilib, CTS-19 segnetokeramika kukunsimon namunalarda (σ) va (ϵ) ning bosim va chastotaga bog'liqligi boshlang'ich sinterlangan keramika namunalaridan nafaqat miqdoriy, balki sifat jihatdan ham farq qilishi aniqlandi. CTS-19 segnetokeramika kukunlarida elektr o'tkazuvchanlik va dielektrik singdiruvchanlikning bosim hamda chastotaga bog'liqligi murakkab relaksatsion tabiatga ega. Bu bog'liqlik materialning ichki mikrostrukturasi, zarrachalararo kontakt holati va sirt energetik xususiyatlari bilan belgilanadi.

O'tkazilgan tadqiqotlar natijasida CTS-19 asosidagi segnetokeramika kukunsimon namunalarining elektr xossalari tashqi mexanik bosim va elektr maydon chastotasiga sezilarli darajada bog'liq ekanligi aniqlandi. Tajribalar shuni ko'rsatdiki, bosim ortishi bilan namunaning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi hamda dielektrik singdiruvchanligi ortib boradi. Bosimning boshlang'ich sohasida kuzatilgan keskin o'sish zarrachalar tizimining zichlanishi, donachalar orasidagi bo'shliqlarning kamayishi va kontakt yuzasining ortishi bilan tushuntirildi. Yuqori bosimlarda esa elektr parametrlarning o'zgarishi barqarorroq xarakter kasb etib, logarifmik koordinatalarda chiziqli bog'lanish hosil qilishi aniqlandi. Bu holat elektr transport jarayonida donachalararo potensial to'siqlar muhim rol o'ynashini ko'rsatdi.

Chastotaviy tahlil natijalari elektr o'tkazuvchanlikning chastota ortishi bilan oshishini, dielektrik singdiruvchanlikning esa kamayishini ko'rsatdi. Elektr o'tkazuvchanlikning darajali qonun bo'yicha o'zgarishi zarrachalararo sig'im va qarshilik elementlariga ega bo'lgan ekvivalent elektr model yordamida izohlandi. Chastota ortishi bilan sig'im qarshiligining kamayishi natijasida zaryad tashuvchilarning harakati osonlashib, umumiy elektr o'tkazuvchanlik ortishi kuzatildi. Shu bilan birga, yuqori chastotalarda dipol qutblanishning tashqi elektr maydoniga to'liq moslasha olmasligi dielektrik singdiruvchanlikning pasayishiga olib kelishi aniqlandi[11].

Kukun holatidagi materialning elektr parametrlari monolit sinterlangan CTS-19 namunalariga nisbatan kichikroq qiymatlarni namoyon etdi. Bu holat maydalash jarayonida zarracha yuzalarida adsorbsion qatlamlarning hosil bo'lishi va qo'shimcha potensial to'siqlarning yuzaga kelishi bilan izohlandi. Natijada

kukunsimon tizimda elektr xossalari nafaqat miqdoriy, balki sifat jihatdan ham boshlang'ich keramik materialdan farq qilishi ko'rsatildi.

Xulosa. Umumiy tahlil shuni ko'rsatadiki, CTS-19 asosidagi segnetokeramik kukunlarda elektr xossalarning shakllanishi ularning mikrostrukturaviy holati, zarrachalararo o'zaro ta'sirlar hamda sirt hodisalari bilan uzviy ravishda bog'liqdir. Mazkur materiallarning bosim va chastota omillariga nisbatan yuqori sezgirliги ularni zamonaviy sensor tizimlari, pyezoelektrik o'zgartirgichlar va funksional elektron qurilmalar ishlab chiqishda istiqbolli materiallar qatoriga kiritish imkonini beradi.

ADABIYOTLAR:

- 1.Uchino, K. (2010). *Advanced piezoelectric materials: Science and technology*. Woodhead Publishing.
- 2.Chiang, Y. M., Birnie, D., & Kingery, W. D. (1997). *Physical ceramics: Principles for ceramic science and engineering*. Wiley.
- 3.Barsoukov, E., & Macdonald, J. R. (Eds.). (2005). *Impedance spectroscopy: Theory, experiment, and applications* (2nd ed.). Wiley.
- 4.Damjanovic, D. (1998). *Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric ceramics*. *Reports on Progress in Physics*, 61(9), 1267–1324. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/61/9/002>
- 5.Jaffe, B., Cook, W. R., & Jaffe, H. (1971). *Piezoelectric ceramics*. Academic Press.
- 6.Haertling, G. H. (1999). *Ferroelectric ceramics: History and technology*. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(4), 797–818. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb01840>.
- 7.Rödel, J., Jo, W., Seifert, K. T. P., Anton, E. M., Granzow, T., & Damjanovic, D. (2009). *Perspective on the development of lead-free piezoceramics*. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(6), 1153–1177. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03061>
- 8.Smyth, D. M. (2000). *The defect chemistry of metal oxides*. Oxford University Press.
9. Xu, Y. (1991). *Ferroelectric materials and their applications*. North-Holland.
- 10.Hodge, I. M. (1994). *Ionic conductivity in polymer and ceramic systems*. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 169, 211–266. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)90321-2](https://doi.org/10.1016/0022-3093(94)90321-2)
- 11.Li, F., Zhang, S., & Chen, L. Q. (2018). *Ultrahigh piezoelectric response in ferroelectrics*. *Nature Communications*, 9, 217. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02677-8>

**TUPROQ TARKIBIDAGI TABIIY RADIONUKLIDLARNI
(^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) ANIQLASHNING GAMMA-SPEKTROMETRIK USULI**

Ibrohimov Vohidjon Umidjon o'g'li,

NavDU, Fizika va astronomiya ta'lim yo'nalishi talabasi

Mavlonova Maftuna G'afur qizi,

NavDU 1-bosqich magistranti

Soliyev Tursunboy Izzatillo o'g'li,

NavDU, Fizika va astronomiya kafedrasi dotsenti, t.f.f.d. (PhD)

tursunboy.soliyev@bk.ru

Annotatsiya. Tuproq namunalari tarkibidagi radioaktivlikni belgilash uchun, ^{226}Ra , ^{232}Th va ^{40}K solishtirma aktivlik qiymatlarini aniqlash zarur hisoblanadi. Namunalar tarkibidagi radionuklidlar miqdorini aniqlashda asosan keng tarqalgan usullardan biri gamma-aktivlashtirilgan spektral tahlil usuli hisoblanadi. Quyida Navoiy viloyati hududining bir qancha tumanlaridan olingan namunalarni tayyorlash, o'lchash usuli va gamma-spektrometrik tahlil natijalari keltirib o'tilgan. Olingan natijalar orqali, tadqiqot o'tkazilgan hududlarda tuproqning radioaktivligi belgilangan me'yorlar qanchalik darajada farq qilishini ko'rsatib berganmiz. Tadqiqot o'tkazilgan hududlar olingan namunalarning gamma-spektrometrik tahlil usuli yordamida olingan natijalari jadvalda keltirildi. Bu natijalar sanitariya qoida va me'yorlari bilan solishtirilib norma darajasida ekanligi xususida xulosalar berildi. Belgilangan normadan qanchalik farqli ekanligini ko'rsatib berish maqsadida olingan natijalar diagramma holatiga keltirildi. Bu diagramma orqali biz tadqiqot hududlaridagi ^{226}Ra , ^{232}Th va ^{40}K solishtirma aktivliklarining qay darajada normadan farq qilishini ham ko'rsatib berdik.

Kalit so'zlar: atrof-muhit, radioekologiya, gamma-spektrometrik tahlil, radiometrik tahlil, sanitariya me'yor va qoidalar, tuproq namunasi, gamma-spektrometr, tabiiy radionuklidlar, jadval, aktivlashtirilgan tahlil, diagramma.

**ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ
РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВЕ (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K)**

Аннотация. Для определения радиоактивности в образцах почвы необходимо определить относительные значения активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Одним из наиболее распространенных методов определения количества радионуклидов в образцах является гамма-спектрометрический анализ. Ниже представлены подготовка, метод измерения и результаты гамма-спектрометрического анализа образцов, взятых из нескольких районов Навоийской области. На основе полученных результатов показано, насколько радиоактивность почвы в исследуемых районах отличается от установленных норм. Результаты, полученные с помощью гамма-спектрометрического анализа образцов, взятых из исследуемых районов, представлены в таблице. Эти результаты были сопоставлены с Санитарными нормами и были сделаны выводы о том, что они находятся в пределах нормы. Для демонстрации того, насколько они отличаются от установленной нормы, полученные результаты представлены в виде диаграммы. С помощью этой диаграммы также показано, насколько относительные активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в исследуемых районах отличаются от нормы.

Ключевые слова: окружающая среда, радиоэкология, гамма-спектрометрический анализ, радиометрический анализ, санитарные нормы и правила, образец почвы, гамма-спектрометр, природные радионуклиды, таблица, активированный анализ, диаграмма.

**GAMMA-SPECTROMETRIC METHOD FOR DETERMINING NATURAL
RADIONUCLIDES IN SOIL (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K)**

Abstract. To determine the radioactivity in soil samples, it is necessary to determine the relative activity values of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K . One of the most common methods for determining the amount of radionuclides in samples is the gamma-activated spectral analysis method. Below are the preparation, measurement method and gamma-spectrometric analysis results of samples taken from several districts of

the Navoi region. Through the results obtained, we have shown how much the radioactivity of the soil in the study areas differs from the established standards. The results obtained using the gamma-spectrometric analysis method of samples taken from the study areas are presented in the table. These results were compared with the Sanitary Rules and Standards and conclusions were drawn that they are within the norm. In order to show how much they differ from the established norm, the results obtained were presented in a diagram. Through this diagram, we also showed how much the relative activities of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in the study areas differ from the norm.

Keywords: environment, radioecology, gamma-spectrometric analysis, radiometric analysis, sanitary standards and regulations, soil sample, gamma-spectrometer, natural radionuclides, table, activated analysis, diagram.

Hozirgi vaqtda dunyoda ixtiyoriy mamlakatning rivojlanishi uchun asosiy strategik mahsulot hisoblangan uran ishlab chiqarish o'sib bormoqda. Olinayotgan uran mahsuloti hajmining oshishi, atrof-muhit (tuproq, suv, havo, ishchilar va aholi) obyektlariga salbiy texnogen ta'sir ko'rsatadi. Bu sharoitda oltin, uran ishlab chiqarish jarayonlari va ularning atrof-muhitga texnogen ta'siri kattaliklarini baholashda kimyoviy elementlar va radionuklidlar miqdorlarini zamonaviy analitik va radiometrik tahlillar asosida aniqlashning yangi va takomillashtirilgan usullarini ishlab chiqish muhim masalardan biri hisoblanadi.

Bugungi kunda dunyoda texnologik namunalarda, texnologik mahsulotlarda va tabiiy muhit obyektlarida juda keng konsentratsiya diapazonida radionuklidlar va kimyoviy elementlarni aniqlash imkonini beruvchi ko'psonli element va radionuklid tarkib tahlili usullari ishlab chiqilgan. Zamonaviy kon-metallurgiya sanoatida, ayniqsa, oltin va uran sanoati texnologik jarayonlarini va tabiiy muhit obyektlarining element va radionuklid tarkibini tahlil qilmasdan, hamda ishchilar va aholi sog'ligini nazorat va monitoring qilmasdan amalga oshirib bo'lmaydi.

O'zbekiston kon-metallurgiya korxonalari iqtisodiy va ishlab chiqarish samaradorligi yil davomida o'n million tonnalab qayta ishlanadigan oltin tarkibli rudalarning va bir necha ming tonnalab qayta ishlanadigan uran tarkibli texnologik mahsulotlarning analitik nazoratida qo'llaniladigan analitik usullarga va asboblarga to'g'ridan-to'g'ri bog'liq. Shundan kelib chiqib, bugungi kunda kon-metallurgiya korxonalarining mahsulot tannarxini kamaytirish va ishlab chiqish samaradorligini oshirish maqsadida oltin va uran ishlab chiqarish texnologik jarayonlari nazoratining tanlangan, ekspress va samarali yangi usullarini ishlab chiqish va oldin ishlab chiqilgan usullarini takomillashtirish talab qilinadi va dolzarb muammo hisoblanadi.

Bugungi kunda O'zbekistonda uran ishlab va ularning atrof-muhitga texnogen ta'siri nazorat usullarining amaliy va nazariy ilmiy asoslarini ishlab chiqish bo'yicha ma'lum natijalarga erishilgan.

Kimyoviy elementlar va radionuklidlar tahlilida mavjud analitik usullar ichida yadro-fizik usullar o'zining instrumentalligi (buzulmaydigan) va yuqori sezuvchanligi, selektivligi, ishonchliligini ta'minlash bo'yicha va analitik jarayonlarni avtomatlashtirishga imkoniligi bo'yicha alohida o'rin tutadi. Bu usullar ko'p elementliligi, tezkorligi, chuqirligi, masofaviyligi va na'munalarni buzmasligi kabi qator prinsipial afzalliklarga ega.

Oltin va uran ishlab chiqarish jarayonlari, monitoring o'tkazish va atrof-muhit muhofazasi sohasida tezkor va yuqori sezgirlikka ega usullar ishlab chiqilishida katta yutuqlarga erishilganiga qaramay ko'plab muammolar hal etilmay qolmoqda. Shu jumladan, oltin, uran va tayyor mahsulotlar ishlab chiqarish texnologik jarayonlari nazorati muammolari, hamda atrof-muhit muhofazasi monitoringini o'tkazish muammolari hal qilinmagan. Uranli ma'danlar tarkibidagi radionuklidlar $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ va $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ orasidagi radioaktiv muvozanat koeffitsiyentini qiymatlarini aniqlash shu ma'dan haqidagi bir qator, ya'ni uning paydo bo'lish sharoiti, qaysi minerallardan tarkib topganligi va uning yeshi haqidagi ko'plab savollarga javob topish imkonini beradi. Shu sababli, uranli ma'danlar tarkibidagi radionuklidlar $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ va $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ orasidagi radioaktiv muvozanat koeffitsiyentini eksperimental aniqlash, olingan natijalar aniqligini oshirish, natijalar bazasini yaratish, olingan natijalarni boshqa tadqiqotchilar natijalari bilan solishtirish, radionuklidlar orasidagi radioaktiv muvozanat buzilishiga ta'sir etuvchi geoximik, geotexnologik, yadro-fizik, radioximik omillarni topish va radioaktiv muvozanat buzilishining asosiy bosh sababini topish yadro-fizikasining asosiy dolzarb muammosi hisoblanadi.

Hozirgi kunda yer yuzida aholi soni ortib borayotganligi hisobiga kundalik ehtiyojlar ham ortib bormoqda. Shu sababli aholi ehtiyojlarini qondirish maqsadida ishlab chiqarish va sanoatning bir qancha sohalari jadal sur'atlarda rivojlanib bormoqda. Buning natijasida esa tabiatdagi ekosistema namunalarning ifloslanishiga olib kelmoqda. Albatta, o'z navbatida, tabiat namunalari tarkibidagi radionuklidlarni nazorat qilish orqali radioekologik holatni baholashning kompleks o'rganish metodlarini ishlab chiqish mumkin.

Tirik organizmlarni nurlantiradigan asosiy tabiiy radioaktiv elementlar uran-238, toriy-232, uran-235 tabiiy radioaktiv oilalar, ularning yemirilish zanjiridagi radionuklidlar va kaliy-40 hisoblanadi. Bundan tashqari, Mendeleyev elementlar davriy sistemasidagi ko'pgina ximiyaviy elementlarning ham radioaktiv izotoplari mavjuddir. Masalan, ^{153}Sm , ^{138}La , ^{115}In , ^{176}Lu , ^{87}Rb . Lekin bu radioaktiv izotoplarning tabiatda tarqalishi kam bo'lganligi va yarim yemirilish davri katta bo'lganligi uchun umumiy atrof-muhit radioaktivligiga qo'shgan hissassi kichikdir. Tabiatda asosan, uran, toriy va kaliy elementlari muhim ahamiyatga egadir. Tuproqdagi tabiiy radioaktiv elementlarni ahamiyatlilik darajasiga qarab ikki guruhga bo'lish mumkin. Birinchi guruhga uran-238, toriy-232 va ularning yemirilishidan hosil bo'ladigan radionuklidlar hamda radioaktiv oilalarga kirmaydigan radionuklid kaliy-40 kiradi. Bu radioaktiv elementlar tuproqlarning radioaktivligini belgilaydi. Ikkinchi guruhga (Lu^{176} , Rb^{87} , In^{115} va boshqalar) radionuklidlar kiradi. Bu radionuklidlar biosferada mavjud, lekin ularning tabiat namunalarida tarqalishi va solishtirma aktivligi hisobga olmaslik darajada kichik. Shunday qilib, hayotiy jarayonlarda birinchi guruhga kiradigan radionuklidlar ahamiyatli darajadadir. Uran-238, toriy-232 va uran-235 radioaktiv elementlarning yarim yemirilish davrlarini yerning yashash vaqti bilan taqqoslaganda shu narsa aniqlanadiki, Yerda toriy-232 deyarli hammasi saqlangan, uran-238 qisman yemirilgan, uran-235 esa kichik miqdorda yemirilgan.

Radioaktiv elementlarning asosiy massasi tog' jinslarida, ayniqsa, magmatik jinslarda joylashgan. Yer qobig'idagi radioaktiv elementlarning 95% i tog' jinslarida bo'ladi. Ma'lumki, tuproqlar tog' jinslari yemirilishidan hosil bo'ladi. Shuning uchun tuproqlar tarkibida turg'un elementlar bilan bir qatorda tog' jinslarida bo'lgan barcha radioaktiv elementlar aniqlanishi mumkin.

Efiopiyadan olingan tuproq namunalarida radiy-226, toriy-232 va kaliy-40 kabi tabiiy radioaktiv elementlarning kontsentratsiya darajasini va mos keladigan radiologik xavf indekslarini o'rgandik. Biz gamma-nurlari spektrometriyasi yordamida kontsentratsiya darajasini aniqladik. Shunga ko'ra, biz radiy, toriy va kaliyning radioaktiv kontsentratsiyasi uchun mos ravishda 64 Bq / kg, 70 Bq / kg va 330 Bq / kg bo'lgan o'rtacha qiymatlarni oldik [1; pp. 1-7].

Kaliy tuzi konlari ishlab chiqilayotgan hududdagi daryolarning tuproq va tub cho'kindilari namunalarida radionuklidlarning tarqalishi haqida ma'lumot to'plash maqsadida ^{226}Ra , ^{232}Th va ^{40}K tabiiy radionuklidlarining solishtirma faolligi gamma spektrometriya yordamida o'lchandi. Tekshiruvlar natijalariga ko'ra, ta'sir hududining tuproqlari va tub cho'kindilarida ^{226}Ra , ^{232}Th va ^{40}K faollik qiymatlari diapazoni <2,17–19,7 Bq/kg, <2,5–20,5 Bq/kg, 123–500 Bq/kg ni tashkil etdi. O'rganilgan radionuklidlarning migratsiyasi 2 km zona bilan cheklangan. Olingan natijalar konchilik obyektlarining ta'sir zonasida tabiiy ravishda uchraydigan radionuklidlar darajasi haqida foydali ma'lumot beradi [2; pp. 179-187].

Namunalarini tanlash va tayyorlash metodikasi. Radionuklidlarni aniqlashdan oldin tuproq namunalarini to'g'ri olish va tayyorlash muhim bosqich hisoblanadi. Odatda tuproq namunasi 0–20 sm chuqurlikdan olinadi. Olingan namuna quritilib, maydalanadi va elakdan o'tkaziladi. Keyin namuna bir xil massa va tarkibga ega bo'lishi uchun yaxshilab aralashtiriladi. Ba'zi hollarda namunalar 450–500 °C haroratda kuydirilib organik moddalardan tozalanadi. Tayyorlangan namuna keyinchalik radiometrik yoki spektrometrik tahlil uchun ishlatiladi. Tuproq namunalaridagi radionuklidlarni aniqlash uchun bir nechta zamonaviy fizik-kimyoviy usullar qo'llaniladi. Eng keng tarqalgan usullardan biri gamma-spektrometriya hisoblanadi. Bu usul gamma nurlanish chiqaruvchi radionuklidlarni yuqori aniqlik bilan aniqlash imkonini beradi. Bundan tashqari alfa-spektrometriya usuli uran, toriy va ularning yemirilish mahsulotlarini aniqlashda qo'llaniladi. Ba'zi hollarda mass-spektrometriya usuli ham ishlatiladi. Mass-spektrometriya ayniqsa izotop nisbatlarini aniqlashda juda yuqori sezgirlikka ega.

Tanlab olingan hududning radiatsion fonga ta'sirini baholashda turli xildagi namunalar tarkibidagi radionuklidlarning aktivliklarini o'lchash orqali natijaga erishiladi. Masalan, tuproq tarkibidagi tabiiy radionuklidlar (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) aktivligini gamma-spektrometriya usuli yordamida o'lchashlar natijasida, o'rtacha yillik effektiv dozani hisoblash va hududning radiatsion xavfsizligi xalqaro me'yoriy qoidalarga qanchalik darajada mos ekanligi ko'rsatib beriladi [3; pp.154-158].

Gamma-spektrometriya usuli. Gamma-spektrometriya tuproq namunalaridagi radionuklidlarni aniqlashda eng ko'p qo'llaniladigan usullardan biridir. Ushbu usulda detektor sifatida ko'pincha yuqori tozalangan germaniy (HPGe) detektorlari ishlatiladi. Namuna detektor oldiga joylashtiriladi va undan chiqayotgan gamma-kvantlar energiyasi bo'yicha tahlil qilinadi. Spektrdagi cho'qqilar ma'lum radionuklidlarga mos keladi. Shu asosda radionuklidlarning mavjudligi va ularning faolligi aniqlanadi. Tabiiy radionuklidlarning faollik kontsentratsiyasi ^{226}Ra , ^{232}Th va ^{40}K radionuklidlarining qishloq xo'jaligi va ishlov berilmagan tuproq namunalarida tasodifiy ravishda Malayziya shimolidagi Kedah shahridan 0-30

sm unumdor tuproq chuqurligida to'plangan. Gamma-nurlari spektrometriyasi yuqori toza germaniy (HPGe) gamma-nurlari detektori va kompyuterga asoslangan MCA yordamida qo'llanildi [4; pp.1-9].

$$A_{eff} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K$$

Bu yerda, A_{Ra} – radiy-226 radionuklidining xususiy aktivligi, A_{Th} – toriy-232 radionuklidining xususiy aktivligi, A_K – kaliy-40 radionuklidining xususiy aktivligi.

Gamma-spektroskopiya radionuklidlar kontsentratsiyasini aniqlash uchun ishlatiladigan to'g'ridan-to'g'ri, buzilmaydigan usuldir, ammo u gamma chiziqlarining aralashuvidan aziyat chekadi. ^{40}K gamma-spektroskopiya fon shovqinidan ta'sirlanadi, bu esa aniqlanadigan minimal faollikning pasayishiga olib keladi. Energiya dispersiv rentgen-analitik texnikasi tez, kamroq shovqin muammolari yoki fon effektlari bilan. Biroq bu izotoplarning kontsentratsiyasini hisoblash va chiqarishning bilvosita usulidir. Ushbu tadqiqotning maqsadi ikkala texnikani solishtirish va ulardan samarali foydalanish uchun baholash edi. ^{238}U va ^{40}K natijalari yaxshi kalibrlangan gamma-spektroskopiya va energiya dispersli rentgen texnikasi bilan o'lchandi [5; pp. 1-11].

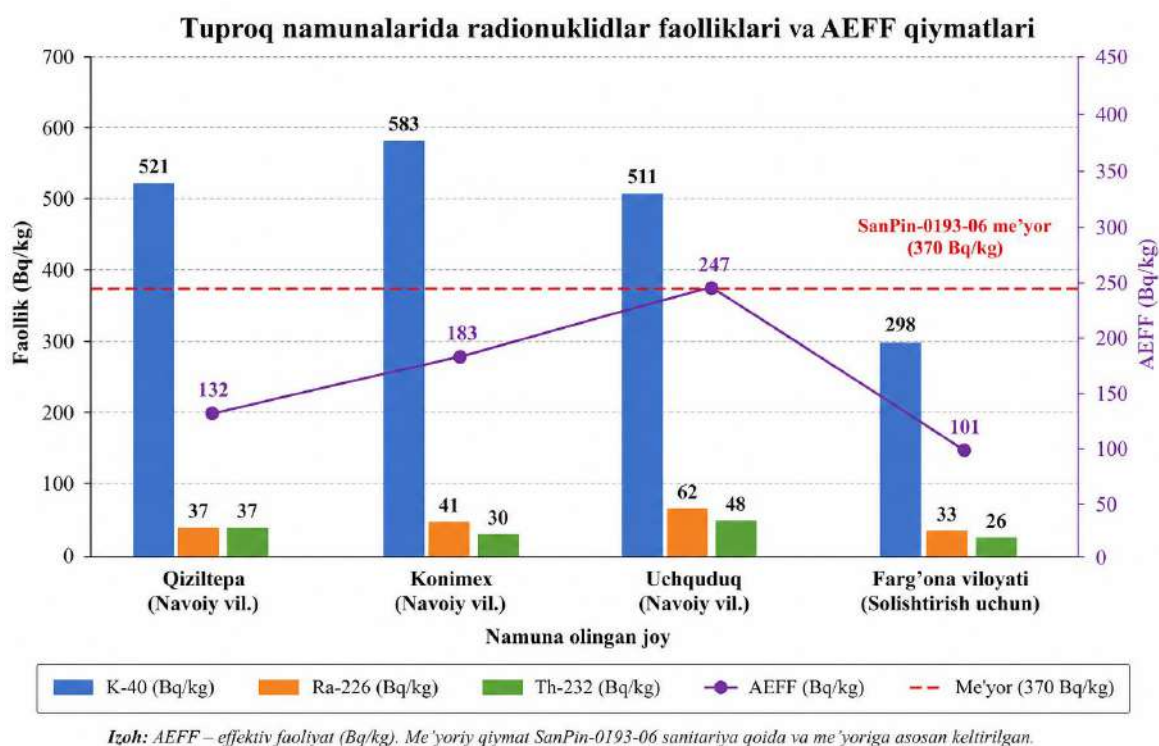
O'rnatilgan metodika yordamida Navoiy viloyatining bir qancha tumanlaridan olingan tuproq namunalari tarkibidagi tabiiy radionuklidlarning aktivligini aniqlash orqali hududning radiofaolligi baholandi. Jumladan, Qiziltepa, Konimex, Uchquduq tumanlarining aholi yashovchi hududlaridan olingan tuproq namunalari tarkibidagi K-40, Ra-226, Th-232 radionuklidlarining solishtirma aktivliklari gamma-spektrometrik usul yordamida aniqlandi. O'lchangan gamma-spektrometrik tahlil natijalaridan foydalanib, hududning effektiv solishtirma aktivlik qiymatlari hisoblandi. Olingan natijalar quyidagi jadvalda keltirilgan.

Tuproq namunalari gamma-spektrometrik tahlil natijalari

1-jadval.

Namuna olingan joy nomi	Spektrometrik usulda olingan natijalar			
	K^{40} Bq/kg	Ra^{226} Bq/kg	Th^{232} Bq/kg	A_{EFF} Bq/kg
Navoiy viloyat tumanlarida olingan natijalar				
Qiziltepa	521	37	37	132
Konimex	583	41	30	183
Uchquduq	511	62	48	247
Solishtirish uchun keltirilgan natijalar				
Farg'ona viloyati	298	33	26	101
SanPin-0193-06 sanitar qoida va me'yorda keltirilgan miqdor				
		-	-	370

Jadval natijalariga ko'ra, Navoiy viloyatining barcha tumanlarida tabiiy radionuklidlar mavjudligi aniqlangan. K-40 radionuklidi eng yuqori qiymatni Konimex tumanida (583 Bq/kg) ko'rsatib, umumiy radioaktivlikka asosiy hissa qo'shmoqda.



Qiziltepa va Uchquduq hududlarida ham K-40 miqdori yuqori bo'lib, mos ravishda 521 va 511 Bq/kg ni tashkil etadi. Ra-226 radionuklidi bo'yicha eng yuqori ko'rsatkich Uchquduq tumanida (62 Bq/kg) qayd etilgan, bu esa ushbu hududda radiatsion fon nisbatan yuqoriroq ekanligini bildiradi. Th-232 radionuklidi ham Uchquduqda eng katta qiymatga (48 Bq/kg) ega bo'lib, boshqa hududlarga nisbatan sezilarli farq qiladi. AEFF (effektiv faoliyat) qiymatlari ichida eng yuqori ko'rsatkich Uchquduqda (247 Bq/kg), eng past esa Farg'ona viloyatida (101 Bq/kg) kuzatilgan. Farg'ona viloyati bilan solishtirganda, Navoiy viloyatidagi barcha tumanlarda radionuklidlar miqdori yuqoriroq ekanligi aniqlanadi. Shunga qaramay, barcha hududlarda AEFF qiymatlari SanPiN-0193-06 da belgilangan 370 Bq/kg me'yoridan past bo'lib, radiatsion xavf darajasi me'yoriy hisoblanadi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, hududlar ichida Uchquduq nisbatan yuqori radiatsion fonli zona sifatida ajralib turadi. Umuman olganda, o'rganilgan hududlarda radiatsion xavfsizlik ta'minlangan bo'lsa-da, muntazam ekologik va radiometrik monitoring olib borish maqsadga muvofiqdir.

Ushbu grafikdan ko'rinadiki, Navoiy viloyatiga tegishli hududlarda sanoat zonasi bo'lganligi sababli solishtirish uchun tanlangan Farg'ona viloyati hududiga nisbatan yuqori ekanligini ko'rishimiz mumkin. Chunki bu hududlar tuproqlarida ishlov berilganligi hisobiga ham o'zgarishlar kuzatiladi. Ammo bu yerda masalaning yana bir jihatiga e'tibor qaratilishi lozim tadqiqot olib borilgan hududlardan olingan namunalar tarkibidagi radionuklidlarning atrof-muhitga beradigan solishtirma aktivligi ta'siri SanPiN-0193-06 tomonidan belgilangan me'yordan oshmasligi kuzatildi.

ADABIYOTLAR:

1. T. Abate. The activity concentrations of radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K of soil samples in the case of Metekel Zone, Ethiopia. *EPJ - Nuclear Sciences & Technologies*, Volume 8, 2022, ISSN 2491-9292, <https://doi.org/10.1051/epjn/2022011>
2. E. Meshnikova, R. Perevoshchikov, P. Belkin, S. Blinov. Concentrations of Natural Radionuclides (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) at the Potash Salts Deposit. *Journal of Ecological Engineering* 2021, 22(3), 179–187. <https://doi.org/10.12911/22998993/132544>
3. Bangotra P, Mehra R, Kaur K, Jakhu R. Study of natural radioactivity (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) in soil samples for the assessment of average effective dose and radiation hazards. *Radiat Prot Dosimetry*. 2016 Oct;171(2):277-281. doi: 10.1093/rpd/ncw074. Epub 2016 Apr 7. PMID: 27056323.
4. Alzubaidi, Ghazwa & Fauziah, Shahul Hamid & Abdul Rahman, Irman. (2016). Assessment of Natural Radioactivity Levels and Radiation Hazards in Agricultural and Virgin Soil in the State of Kedah, North of Malaysia. *The Scientific World Journal*. 2016. 1-9. 10.1155/2016/6178103.
5. Al-Ghamdi, Hanan & Elnahal, Mohamed & Saleh, Ibrahim & Elsafi, Mohamed & Almuqrin, Aljawhara. (2022). Determination of U and K Radionuclide Concentrations in Some Granite Rocks by Gamma Spectroscopy and Energy Dispersive X-ray Analysis. *Materials*. 15. 5130. 10.3390/ma15155130.

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЗОННЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК ZnO/Si, Cu₂O/Si И CuO/Si

Арзикулов Фазлиддин Фахриддинович,

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,

Ташкент, Узбекистан,

arzikulovfazliddin1997@gmail.com

Мустафакулов Асрор Ахмедович,

Джизакский политехнический институт, Джизак, Узбекистан,

asrormustafaqulov@gmail.com

Саидов Сафо Олимович,

Бухарский государственный университет, Бухара, Узбекистан,

safo.saidov.64@mail.ru

Игамов Бахром Джурраевич,

Научно-технический центр с конструкторским бюро и

опытно-промышленным производством, Академия наук Республики Узбекистан,

igamov_bd@mail.ru

Косимов Исроил Одинаевич,

Институт биоорганической химии им. А.С. Садыкова Академии наук

Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан,

isroilkosimov@list.ru

Хушбаков Баходир Эркинович,

Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий, Термез, Узбекистан,

bahodirxushboqov@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследовано влияние гамма-облучения на электрофизические и зонные свойства тонких плёнок ZnO/Si, Cu₂O/Si и CuO/Si, полученных методом магнетронного распыления в одинаковых технологических условиях. Установлено, что радиационный отклик исследуемых плёнок носит выраженный материал-зависимый характер. Для ZnO/Si после облучения наблюдаются уменьшение удельного сопротивления и рост электропроводности, что согласуется с увеличением концентрации электронов при одновременном снижении их подвижности. Для Cu₂O/Si и CuO/Si, напротив, выявлены рост сопротивления и ослабление проводимости, что связано с усилением локализации носителей заряда, увеличением вклада ловушечных состояний и ограничением переноса на дефектных и межзёрненных барьерах. Показано, что уменьшение эффективной ширины запрещённой зоны после облучения не имеет одинакового электрического следствия для всех материалов: в ZnO/Si оно сопровождается усилением электронной проводимости, тогда как в Cu₂O/Si и CuO/Si соответствует углублению дефектно-обусловленного ограничения переноса. Научная новизна работы состоит в выявлении материал-зависимой инверсии радиационного отклика в единой серии оксидных плёнок, синтезированных при одинаковых условиях и подвергнутых одному режиму гамма-облучения.

Ключевые слова. тонкие плёнки, оксид цинка, оксид меди(I), оксид меди(II), гамма-облучение, удельное сопротивление, концентрация носителей заряда, подвижность, электропроводность, ширина запрещённой зоны

ZnO/Si, Cu₂O/Si VA CuO/Si ЮПҚА ПЛЁНКАЛАРИНИНГ ЭЛЕКТРОФИЗИК ВА ЗОНАЛ ХОССАЛАРИГА ГАММА-НУРЛАНИШ ТАЪСИРИ

Аннотация. Ушбу ишда бир хил технологик шароитларда магнетрон пуркаш усули билан олинган ZnO/Si, Cu₂O/Si ва CuO/Si юпқа плёнкаларига гамма-нурланиш таъсири остидаги электрофизик ва зонал хоссалар ўрганилди. Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, радиацион жавоб материал табиатига кучли даражада боғлиқ. ZnO/Si плёнкаларида нурланишдан кейин солиштирма қаршилиқнинг камайиши ва электр ўтказувчанликнинг ортиши кузатилди, бу электронлар концентрациясининг ортиши ҳамда уларнинг ҳаракатчанлиги камайиши билан мос келади. Cu₂O/Si ва CuO/Si плёнкаларида эса, аксинча, қаршилиқ ортиши ва ўтказувчанликнинг

пасайиши аниқланди, бу заряд ташувчиларнинг локализацияси кучайиши, тузоқ ҳолатлари ҳиссасининг ортиши ва дефект ҳамда доналараро тўсиқларда транспортнинг чекланиши билан изоҳланади. Нурланишдан кейин эффектив тақиқланган зона кенглигининг камайиши барча материалларда бир хил электр оқибатга олиб келмаслиги кўрсатилди: ZnO/Si да бу ҳолат электрон ўтказувчанликнинг кучайиши билан бирга кечса, Cu₂O/Si ва CuO/Si да дефект билан бошқариладиган транспорт чекланишининг чуқурлашишига мос келади. Ишнинг илмий янгилиги бир хил шароитда синтез қилинган ва бир хил гамма-нурланиш режимида дучор қилинган оксид плёнкалар қаторида радиацион жавобнинг материалга боғлиқ инверсияси аниқлангани билан белгиланади.

Калим сўзлар: юпқа плёнка, рух оксиди, мис(I) оксиди, мис(II) оксиди, гамма-нурланиш, солиштирма қаришлик, заряд ташувчилар концентрацияси, ҳаракатчанлик, электр ўтказувчанлик, тақиқланган зона кенглиги.

EFFECT OF GAMMA IRRADIATION ON THE ELECTROPHYSICAL AND BAND PROPERTIES OF ZnO/Si, Cu₂O/Si AND CuO/Si THIN FILMS

Abstract. This work investigates the effect of gamma irradiation on the electrophysical and band properties of ZnO/Si, Cu₂O/Si and CuO/Si thin films deposited by magnetron sputtering under identical technological conditions. It is established that the radiation response of the studied films is strongly material-dependent. For ZnO/Si, irradiation leads to a decrease in resistivity and an increase in electrical conductivity, which is consistent with an increase in electron concentration accompanied by a decrease in mobility. In contrast, Cu₂O/Si and CuO/Si exhibit an increase in resistivity and a decrease in conductivity, which is associated with enhanced carrier localization, a greater contribution of trap states, and transport limitation at defect-related and grain-boundary barriers. It is shown that the reduction of the effective band gap after irradiation does not produce the same electrical consequence in all materials: in ZnO/Si it accompanies enhanced electronic conductivity, whereas in Cu₂O/Si and CuO/Si it corresponds to a deeper defect-controlled restriction of charge transport. The scientific novelty of the work lies in revealing a material-dependent inversion of the radiation response within a unified series of oxide films synthesized under identical conditions and subjected to the same gamma-irradiation regime.

Keywords: thin films, zinc oxide, copper(I) oxide, copper(II) oxide, gamma irradiation, resistivity, carrier concentration, mobility, electrical conductivity, band gap.

Введение. Оксидные полупроводниковые материалы на основе цинка и меди представляют значительный интерес для современной физики конденсированного состояния и материаловедения благодаря сочетанию технологической доступности, химической устойчивости и широких возможностей управления их электрическими и оптическими свойствами [1–3]. Тонкие плёнки оксида цинка, оксида меди(I) и оксида меди(II) рассматриваются как перспективные функциональные материалы для фоточувствительных, оптоэлектронных и сенсорных устройств, поскольку их характеристики в существенной степени определяются дефектным состоянием, стехиометрией, морфологией поверхности и условиями получения [1–3].

Оксид цинка относится к широкозонным полупроводникам n-типа и отличается сравнительно высокой подвижностью носителей заряда, что делает его удобным модельным объектом для анализа электронного переноса [1]. Напротив, оксид меди(I) и оксид меди(II) являются материалами с дырочным типом проводимости, более узкой запрещённой зоной и существенно более сильной ролью локализованных состояний, ловушечных уровней и рекомбинационных процессов [2, 3]. Вследствие этого системы ZnO/Si, Cu₂O/Si и CuO/Si представляют собой удобный ряд объектов, в котором можно проследить закономерную эволюцию электрофизических характеристик и механизмов переноса заряда в зависимости от природы оксидного слоя [1–3].

Особый интерес представляет воздействие гамма-излучения на подобные плёночные системы. Ионизирующее излучение способно вызывать изменение дефектного состояния полупроводника, влиять на концентрацию носителей заряда, их подвижность, удельное сопротивление, электропроводность и положение энергетических уровней [4–6]. Однако характер такого влияния не является универсальным: в одних материалах радиационное воздействие может приводить к росту вклада донороподобных состояний, в других — к усилению рекомбинации, локализации носителей и росту сопротивления [4–6]. Поэтому сопоставительное исследование нескольких оксидных плёнок, сформированных в одинаковых технологических условиях и подвергнутых одному и тому же режиму облучения, представляет не только прикладной, но и фундаментальный интерес [4–6].

Несмотря на большое число публикаций, посвящённых тонким плёнкам ZnO, Cu₂O и CuO, вопрос о сравнительном изменении их транспортных и зонных характеристик под действием гамма-излучения остаётся раскрытым недостаточно полно [1–6]. В особенности это относится к случаям, когда исследуемые материалы получены в сопоставимых условиях и анализируются по единому набору параметров, включающему удельное сопротивление, концентрацию носителей заряда, подвижность, электропроводность и ширину запрещённой зоны. В такой постановке становится возможным выявить не только абсолютные различия между материалами, но и их различную чувствительность к радиационно-индуцированному изменению дефектной структуры [4–6].

В связи с этим в настоящей работе исследовано влияние гамма-облучения на электрофизические и зонные свойства тонких плёнок ZnO/Si, Cu₂O/Si и CuO/Si, полученных при одинаковых технологических условиях. Основное внимание уделено сравнительному анализу удельного сопротивления, концентрации носителей заряда, подвижности, электропроводности и ширины запрещённой зоны до и после облучения, а также обсуждению возможной связи наблюдаемых изменений с дефектным состоянием и особенностями электронного переноса в указанных оксидных материалах.

Материалы и методы исследования.

1. Подложки и их подготовка. В экспериментах в качестве подложек использовались монокристаллические кремниевые пластины р-типа с ориентацией (111) и толщиной 450 ± 2 мкм. Для обеспечения воспроизводимого состояния поверхности подложки подвергались многостадийной очистке: ультразвуковой обработке в ацетоне, этаноле и деионизированной воде, затем обработке в растворе RCA-1 (NH₄OH:H₂O₂:H₂O = 1:1:5) при температуре 75 °C в течение 10 мин [7]. Естественный слой SiO₂ удаляли травлением в 2%-м растворе HF в течение 1–2 мин с последующей промывкой в деионизированной воде. В ряде случаев перед осаждением дополнительно применялась очистка в аргоновой плазме мощностью 10 Вт в течение 5 мин для повышения активности поверхности.

2. Формирование тонких плёнок. Тонкие плёнки ZnO, Cu₂O и CuO формировали на подложках Si(111) в одинаковых технологических условиях методом магнетронного распыления на установке UVN-75R. Для каждого материала готовили по пять образцов. Время осаждения составляло 5 мин, а толщина полученных покрытий — около 300 нм.

Плёнки ZnO осаждали с использованием мишени ZnO чистотой 99.99% при базовом давлении порядка 5×10^{-6} Торр, рабочем давлении $(2\text{--}5) \times 10^{-3}$ Торр, мощности 90 Вт и расстоянии мишень–подложка 60 мм. В качестве рабочего газа использовали аргон с добавлением кислорода в диапазоне 1–5%.

Плёнки Cu₂O и CuO получали реактивным магнетронным распылением медной мишени чистотой 99.99% при базовом давлении порядка 4×10^{-6} Торр, рабочем давлении 3×10^{-3} Торр, мощности 70–90 Вт и расстоянии мишень–подложка 55–60 мм. При содержании кислорода 5–10% формировалась фаза Cu₂O, тогда как при 20–30% — фаза CuO.

3. Гамма-облучение. Гамма-облучение образцов проводили с использованием радиоактивного источника Co-60 в диапазоне доз порядка 0.1–1 МГр. Для каждого материала сопоставляли параметры до и после облучения, что позволяло оценить материал-зависимый характер радиационно-индуцированных изменений электрофизических свойств.

4. Методы анализа. Электрофизические свойства плёнок определяли до и после облучения на установке HMS-7000. Анализ включал оценку удельного сопротивления, концентрации носителей заряда, подвижности и электропроводности.

Структурное и морфологическое состояние образцов контролировали методами рентгенодифракционного анализа, сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. По материалам сопутствующих экспериментов морфология поверхности и элементный состав также сопоставлялись с данными электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, что использовалось для дополнительной проверки фазового и химического состояния плёнок.

Оптические свойства материалов, в частности ширину запрещённой зоны E_g , оценивали по методу Така [8]. В настоящей работе основной акцент сделан на сопоставительном анализе изменений удельного сопротивления, концентрации носителей заряда, подвижности, электропроводности и ширины запрещённой зоны под действием гамма-излучения.

Результаты и их обсуждение.

1. Структурно-морфологические предпосылки изменения электрофизических свойств.

Интерпретация электрофизических характеристик тонких плёнок ZnO/Si, Cu₂O/Si и CuO/Si должна опираться не только на измеренные значения удельного сопротивления, концентрации носителей заряда, подвижности и электропроводности, но и на исходное структурно-морфологическое состояние слоёв. Для оксидных полупроводников именно морфология поверхности, размер зёрен, степень их агломерации, плотность межзёренных границ и дефектное состояние существенно влияют на характер рассеяния носителей и на соотношение между делокализованным и локализованным переносом. Для ZnO это обычно связывают с ролью кислородных вакансий, межузельных атомов цинка и качеством кристаллической упаковки, тогда как для Cu₂O и CuO существенно возрастает вклад границ зёрен, неоднородности окисления и локализованных состояний [1–3].

Согласно имеющимся экспериментальным данным, в настоящей работе структурное и морфологическое состояние образцов подтверждалось методами рентгенодифракционного анализа, сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии, тогда как основной акцент был сделан на сравнительном анализе электрофизических свойств до и после гамма-облучения. При этом сами плёнки ZnO, Cu₂O и CuO были получены в одинаковых технологических условиях на подложках Si(111), что делает корректным их сопоставление как единой серии объектов. По данным морфологического анализа, для ZnO/Si характерна более плотная, сравнительно гладкая и однородная поверхность с меньшей степенью структурной неоднородности. Такой результат хорошо согласуется с литературными данными, согласно которым при магнетронном распылении ZnO способен формировать достаточно упорядоченные и равномерные слои, а вариации электрофизических свойств в значительной степени определяются кислородным режимом, собственными дефектами и условиями последующей обработки [1]. Более однородная морфология ZnO обычно соответствует меньшему вкладу межзёренного барьерного рассеяния и более благоприятным условиям для электронного переноса.

Для плёнок Cu₂O/Si в загруженных материалах отмечены более крупные зёрна при сохранении в целом достаточно однородной поверхности. Такое поведение соответствует литературным наблюдениям для реактивно распылённых слоёв Cu₂O: при подходящих условиях осаждения они могут сохранять выраженную зеренную структуру без резкой деградации сплошности, однако уже на этом уровне возрастает роль межзёренных границ и чувствительность к вариациям парциального давления кислорода, температуры и последующей обработки [2]. Именно эти факторы заметно влияют на кристалличность, размер зёрен и, как следствие, на подвижность и сопротивление Cu₂O-плёнок.

Наиболее выраженная структурная неоднородность наблюдается для CuO/Si: в имеющемся описании подчёркнуты более высокая шероховатость, укрупнение зёрен, агломерация и рост пористости. Такое состояние особенно важно для последующего анализа транспорта, поскольку увеличение роли межзёренных границ и локальных неоднородностей обычно сопровождается усилением рассеяния, снижением эффективной подвижности и ростом вклада локализованных состояний. Литературные данные по медьсодержащим оксидным плёнкам, полученным распылением, также показывают, что рост содержания кислорода и изменение условий осаждения могут приводить к существенной перестройке морфологии, увеличению шероховатости и изменению электрических характеристик [2,3].

Дополнительную физическую опору даёт элементный анализ. Для ZnO/Si фиксируются сигналы Zn и O, а для Cu₂O/Si и CuO/Si — Cu и O; при этом вклад сигнала Si связан с подложкой и должен учитываться при интерпретации результатов. Для медьсодержащих оксидных слоёв различие в относительном содержании кислорода согласуется с переходом от Cu₂O к CuO, то есть с возрастанием степени окисления. Это важно не только с химической, но и с электрофизической точки зрения, поскольку изменение кислородного баланса и дефектной химии прямо связано с изменением типа и плотности локализованных состояний, определяющих проводимость и характер переноса [2,3].

Таким образом, уже на структурно-морфологическом уровне исследуемые системы образуют физически осмысленный ряд: ZnO/Si соответствует более однородному и сравнительно менее дефектно-разупорядоченному состоянию, Cu₂O/Si занимает промежуточное положение, а CuO/Si характеризуется более выраженной морфологической неоднородностью и, вероятно, более сильным ограничением переноса на границах зёрен и локализованных состояниях. Именно поэтому последующее сравнение удельного сопротивления, концентрации носителей заряда, подвижности и

электропроводности должно рассматриваться не изолированно, а в прямой связи с морфологией, фазовым состоянием и дефектной химией плёнок [1–3].

2. Удельное сопротивление и материал-зависимый отклик на гамма-облучение.

Сравнительный анализ удельного сопротивления показывает, что воздействие гамма-излучения приводит к разнонаправленному изменению электрического отклика исследуемых плёнок: для ZnO/Si сопротивление после облучения уменьшается, тогда как для Cu₂O/Si и CuO/Si, напротив, возрастает. Такой результат принципиально важен, поскольку он указывает на отсутствие универсального сценария радиационного воздействия для всех оксидных полупроводников одной серии. В данном случае знак и масштаб изменения ρ определяются не только фактом облучения как таковым, но и типом проводимости материала, его исходной дефектной подсистемой, морфологией и характером локализованных состояний. Подобная постановка хорошо согласуется с современными представлениями о том, что радиационно-индуцированный отклик в оксидных тонких плёнках определяется конкуренцией между генерацией новых дефектных состояний, их частичной пассивацией и изменением барьеров переноса на границах зёрен [4–6, 10].

Для ZnO/Si уменьшение удельного сопротивления после гамма-облучения можно рассматривать как результат увеличения вклада донороподобных состояний на фоне сохранения электронной проводимости n-типа. Особенно показательно, что в недавней работе по γ -облучённым плёнкам ZnO было зафиксировано сходное сочетание параметров: после облучения сопротивление и подвижность уменьшались, тогда как концентрация носителей возрастала [13]. Подобная тенденция согласуется и с данными по Co-60-облучённым плёнкам ZnO, где изменения структуры и оптических характеристик связывались с радиационно-индуцированной перестройкой дефектного состояния [4]. В этом смысле уменьшение ρ в исследуемых плёнках ZnO/Si разумно интерпретировать не как следствие улучшения качества слоя, а как результат дефектно-обусловленного перераспределения свободных электронов на фоне усиления дефектного рассеяния [4, 10].

Для Cu₂O/Si наблюдается противоположный отклик — рост удельного сопротивления после облучения. Современные работы по реактивно распылённым плёнкам Cu₂O показывают, что их электрические свойства чрезвычайно чувствительны к фазовой чистоте, технологическому давлению, концентрации вакансий кислорода и формированию акцепторных состояний [2, 9, 11, 12]. Так, в исследовании 2024 года показано, что изменение условий распыления вызывает фазовую перестройку медьсодержащих оксидных плёнок и заметно влияет на концентрацию проводящих состояний [11]. В работе 2025 года снижение сопротивления в Cu₂O достигалось уже за счёт специальной модификации дефектной химии — азотного легирования, приводящего к формированию мелких акцепторных состояний [12]. На этом фоне рост ρ в наших небогатённых облучённых плёнках Cu₂O/Si выглядит физически правдоподобным: гамма-облучение здесь, по-видимому, не создаёт эффективных проводящих состояний, а усиливает рекомбинационные и локализационные процессы.

Для CuO/Si увеличение сопротивления после облучения представляется ещё более закономерным. Именно для CuO/Si в исследуемой серии характерны наиболее выраженные морфологическая неоднородность, повышенная шероховатость и более существенная роль межзёренных границ, что было показано в предыдущем подразделе. Современные исследования медьсодержащих оксидных плёнок также подтверждают, что при росте степени окисления и усложнении морфологии вклад локализованных состояний и барьерного ограничения переноса возрастает [3, 11]. Дополнительный интерес представляет работа 2025 года, в которой для тонких плёнок CuO отдельно показана чувствительность оптических характеристик к гамма- и ультрафиолетовому воздействию, что указывает на высокую восприимчивость дефектной подсистемы CuO к радиационному возмущению [13]. В совокупности это хорошо согласуется с тем, что в наших образцах CuO/Si после облучения возрастает ρ : при исходно более неоднородной структуре радиационно-индуцированные дефекты, по-видимому, не облегчают перенос, а дополнительно усиливают локализацию и рекомбинационные потери.

Таким образом, материал-зависимый характер изменения удельного сопротивления после гамма-облучения следует рассматривать как один из ключевых результатов работы. Для ZnO/Si уменьшение ρ согласуется с ростом вклада донороподобных дефектных состояний и увеличением концентрации носителей при одновременном снижении подвижности. Для Cu₂O/Si и CuO/Si увеличение ρ лучше согласуется с усилением локализации, ростом роли ловушечных центров и ограничением переноса на дефектных и межзёренных барьерах [4, 10–13]. При этом, с точки зрения строгой научной интерпретации, корректнее говорить не о прямом доказательстве конкретного

микроскопического механизма, а о физически обоснованном соответствии между наблюдаемым электрофизическим откликом, морфологией плёнок и теми тенденциями, которые уже описаны в современной литературе по ZnO, Cu₂O и CuO тонким плёнкам.

3. Концентрация носителей заряда и подвижность.

Изменение удельного сопротивления в исследуемых плёнках после гамма-облучения необходимо рассматривать через совместную эволюцию концентрации носителей заряда и их подвижности, поскольку именно эти два параметра определяют проводимость по соотношениям $\sigma = qn\mu$ для электронного и $\sigma = qp\mu$ для дырочного переноса. Поэтому сам по себе факт роста или падения ρ ещё не раскрывает физический механизм: для этого необходимо понять, какой из двух множителей — число носителей или эффективность их перемещения — изменяется сильнее. В исследуемой серии именно здесь проявляется ключевое расхождение между материалами: у ZnO/Si уменьшение сопротивления сочетается с ростом концентрации носителей при ухудшении подвижности, тогда как у Cu₂O/Si и CuO/Si рост сопротивления логически требует либо снижения эффективной концентрации дырок, либо усиления их локализации, либо совместного действия обоих факторов. Такая картина показывает, что гамма-облучение действует не как единый «улучшатель» или «деградатор», а как внешний фактор, раскрывающий различие внутренней дефектной физики ZnO и медьсодержащих оксидов [10, 14, 15].

Для ZnO/Si наиболее содержательная интерпретация связана с конкуренцией двух процессов. С одной стороны, радиационное воздействие, по-видимому, увеличивает вклад донороподобных состояний, что приводит к росту концентрации электронов; с другой стороны, возникающие и перераспределяющиеся дефекты уменьшают среднюю длину свободного пробега и усиливают рассеяние, из-за чего подвижность падает. Именно такой сценарий был зафиксирован в работе 2024 года по γ -облучённым плёнкам ZnO<S>: после облучения их удельное сопротивление уменьшилось, концентрация носителей возросла, а подвижность, напротив, снизилась; авторы связывают этот эффект с радиационно-индуцированной перестройкой структуры и уменьшением размеров кристаллитов [13]. Дополнительную опору этому выводу дают исследования плёнок ZnO, осаждённых в кислородно-бедных и кислородно-богатых условиях: показано, что низкое сопротивление связано с высокой концентрацией межузельного цинка и кислорододефицитных состояний, тогда как подвижность в значительной степени определяется кристалличностью плёнки [14, 15]. Иначе говоря, для ZnO литературные данные подтверждают именно тот тип развязки параметров, который наблюдается и в нашей работе: n и μ реагируют на дефектную модификацию по-разному, а знак изменения ρ задаётся тем, какой из этих вкладов доминирует.

Для Cu₂O/Si физическая ситуация принципиально иная. В этом материале даже при отсутствии облучения перенос существенно зависит от баланса акцепторных состояний, размеров зёрен, плотности сложных дефектов и наличия фазовых примесей. Современные работы показывают, что высокая дырочная подвижность в Cu₂O достигается только при специально оптимизированной дефектной структуре: в исследовании 2024 года лазерная термообработка реактивно распылённых плёнок заметно повышала дырочную подвижность, а в работе по получению плёнок Cu₂O с высокой дырочной подвижностью показано, что улучшение переноса связано с уменьшением общей дефектности и ослаблением мелких акцептороподобных рассеивателей [16, 17]. В работах по послеосадочному отжигу Cu₂O также подчёркивается, что концентрация носителей, проводимость и сопротивление чувствительны даже к сравнительно мягкой термической обработке [18]. На этом фоне рост сопротивления в наших облучённых плёнках Cu₂O/Si выглядит не случайным, а физически закономерным: гамма-облучение здесь, вероятно, не создаёт устойчивый канал генерации полезных дырочных состояний, а, напротив, усиливает роль ловушек, компенсации и локализации. Научно важная деталь состоит в том, что Cu₂O реагирует на одно и то же внешнее воздействие противоположно ZnO: там, где ZnO ещё может «выиграть» за счёт роста электронов, Cu₂O уже «проигрывает» из-за деградации эффективного дырочного транспорта.

Для CuO/Si тенденция к ухудшению транспортных параметров после облучения должна быть ещё более выраженной, поскольку для CuO характерны более сильная локализация носителей, меньшая дисперсия зон и большая роль дефектно-обусловленного переноса по сравнению с ZnO. В недавнем исследовании по медьсодержащим оксидным плёнкам, полученным магнетронным распылением, показано, что при переходе от Cu₂O к Cu₄O₃ и CuO изменяются фазовый состав, пассивируются кислородные вакансии и существенно меняются концентрация носителей и подвижность; при этом измерения эффекта Холла напрямую подтверждают высокую чувствительность этих параметров к дефектной химии и степени окисления [11]. Для нашей серии

это особенно важно, поскольку по морфологическим данным именно CuO/Si изначально является наиболее неоднородным слоем с более выраженной ролью межзёренных границ. Дополнительные современные исследования дефектной инженерии в CuO показывают, что изменение дефектной подсистемы напрямую влияет на локализацию и оптоэлектронные свойства материала [19]. Следовательно, дополнительное радиационное дефектообразование здесь с высокой вероятностью не повышает число эффективно подвижных носителей, а усиливает их захват и барьерное ограничение переноса. В отличие от ZnO, где уменьшение μ ещё может быть перекрыто ростом n , для CuO такое перекрытие менее вероятно: система уже находится ближе к режиму локализованного переноса, и потому падение подвижности здесь оказывается более «дорогим» для общей проводимости.

Если сопоставить все три материала в одной логике, то проявляется важная физическая линия настоящей работы. Плёнки ZnO/Si, Cu₂O/Si и CuO/Si были получены в одинаковых технологических условиях и подвергнуты одному и тому же типу гамма-воздействия, однако их ответ на уровне концентрации носителей и подвижности оказался качественно различным. Именно в этом и состоит научная новизна результата: работа показывает не просто факт изменения параметров после облучения, а расщепление сценариев переноса внутри одной оксидной серии. Для ZnO/Si реализуется режим, в котором дефектная модификация ещё сохраняет или даже усиливает донорный вклад; для Cu₂O/Si и CuO/Si тот же тип воздействия смещает систему в сторону локализации, ловушечного ограничения и ухудшения дырочного переноса. В более жёсткой формулировке это можно назвать материал-зависимой инверсией радиационного отклика: одинаковое облучение приводит не к количественно разным, а к физически разнотипным изменениям параметров переноса. Такой вывод согласуется и с собственными данными статьи, и с современной литературой по дефектно-чувствительным плёнкам ZnO, Cu₂O и CuO [10, 14–19].

При этом, с точки зрения строгой интерпретации, необходимо подчеркнуть границу доказанности. Настоящая работа не идентифицирует напрямую атомную конфигурацию каждого радиационного дефекта и не разделяет количественно вклад всех возможных каналов рассеяния. Однако совокупность наблюдаемых изменений ρ , концентрации носителей, подвижности, морфологического состояния и ширины запрещённой зоны позволяет уверенно утверждать, что гамма-облучение в рассматриваемой серии плёнок изменяет прежде всего дефектно-управляемый баланс между генерацией носителей и их локализацией. Именно эта причинная цепочка, объединяющая морфологию, дефектную химию и транспортный отклик, и составляет физическое ядро полученного результата.

4. Электропроводность и механизмы переноса.

Электропроводность исследуемых плёнок является наиболее интегральной характеристикой их радиационного отклика, поскольку именно в ней совместно проявляются изменения концентрации носителей заряда, их подвижности, степени локализации и роли межзёренных барьеров. В этом смысле σ представляет собой не просто производную величину от n и μ , а итог конкуренции между генерацией проводящих состояний и усилением дефектно-обусловленного ограничения переноса. Для рассматриваемой серии плёнок анализ проводимости особенно важен потому, что он позволяет увидеть не только изменение численных параметров, но и постепенную перестройку доминирующего механизма переноса от преимущественно зонного к всё более локализованному. [14, 15, 20, 21]

Для ZnO/Si увеличение электропроводности после гамма-облучения следует интерпретировать как результат того, что рост электронной концентрации оказывается сильнее, чем сопутствующее снижение подвижности. Такой сценарий хорошо согласуется с современными представлениями о переносе в ZnO: кислорододефицитное состояние, межузельные атомы цинка и дефектные комплексы в целом могут увеличивать число проводящих электронов, тогда как подвижность в большей степени контролируется микроструктурой и рассеянием на дефектах. Недавние работы по ZnO-плёнкам, сформированным в различных кислородных режимах, показывают, что повышенная проводимость обычно связана именно с ростом плотности электронных носителей, тогда как при ухудшении кристалличности и росте дефектности подвижность закономерно снижается. В этом смысле рост σ в плёнках ZnO/Si после облучения отражает не «улучшение» материала, а переход к более дефектно-донорному режиму переноса, в котором электронный транспорт сохраняет в основном зонный характер, хотя и сопровождается усилением рассеяния. [14, 15, 20, 21]

Для Cu₂O/Si картина принципиально иная. В литературе подчёркивается, что высокая проводимость и высокая дырочная подвижность в Cu₂O реализуются только при очень аккуратном контроле дефектной структуры, фазовой чистоты и межзёренного строения. Именно поэтому в работах, где удаётся получить Cu₂O с высокой дырочной подвижностью и пониженным

сопротивлением, авторы связывают это с уменьшением дефектного беспорядка, оптимизацией акцепторных состояний и ослаблением рассеяния на границах зёрен. На этом фоне уменьшение проводимости в наших плёнках $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ после гамма-облучения выглядит физически содержательно: облучение действует здесь в сторону, противоположную технологической оптимизации, то есть увеличивает долю ловушечных и компенсирующих состояний, ослабляет эффективный дырочный транспорт и усиливает вклад локализации. Поэтому для $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ разумно говорить уже не о чисто зонном механизме, а о смешанном режиме, в котором делокализованный перенос сосуществует с термически активируемым прохождением через дефектные и межзёренные барьеры. [16–18]

Для CuO/Si уменьшение электропроводности после гамма-облучения выглядит наиболее закономерным и одновременно наиболее физически показательным. В отличие от ZnO и даже Cu_2O , система CuO уже исходно ближе к режиму локализованного транспорта: малая дисперсия зон, значительная роль дефектов, межзёренных барьеров и сильного взаимодействия носителей с решёткой делают здесь более вероятным не зонный, а поляроноподобный или прыжковый механизм переноса. Современные исследования CuO - и медьсодержащих оксидных плёнок показывают, что изменение дефектного состояния — через кислородный режим, фазовую перестройку или целенаправленную дефектную инженерию — заметно меняет проводимость именно потому, что даже небольшая перестройка локализованных состояний отражается на вероятности прыжкового переноса. Поэтому наблюдаемое в нашей работе снижение σ у CuO/Si после гамма-облучения наиболее логично связывать с усилением дефектно-ловушечного ограничения: система смещается ещё дальше от делокализованного переноса и ещё сильнее зависит от термически активируемых переходов между локализованными состояниями. [11, 19]

Если сопоставить все три материала в единой логике, то получаем не просто набор частных наблюдений, а цельную физическую картину. В ZnO/Si гамма-облучение переводит систему в режим более высокой электронной проводимости за счёт дефектно-индуцированного роста числа носителей при сохранении в целом делокализованного канала переноса. В $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ тот же тип воздействия уже уменьшает проводимость, так как усиливает роль дефектных барьеров и подталкивает систему к смешанному механизму переноса. В CuO/Si радиационный отклик становится ещё более жёстким: вклад локализованных состояний и прыжкового переноса усиливается настолько, что именно дефектно-ограниченный транспорт начинает определять общий электрический ответ. В этом и состоит одна из ключевых новизн линий настоящей работы: при одинаковых условиях синтеза и одинаковом режиме облучения показана не просто разница в уровне проводимости трёх оксидных систем, а последовательная смена доминирующего механизма переноса от более зонного к более локализованному. [11, 14–21]

С точки зрения строгой интерпретации важно провести границу между физически обоснованным выводом и переутверждением. Настоящая работа не извлекает параметры прыжкового механизма из температурных зависимостей проводимости и не разделяет количественно вклад всех возможных каналов рассеяния. Однако совокупность данных по удельному сопротивлению, концентрации носителей, подвижности, морфологическому состоянию и положению запрещённой зоны позволяет с высокой степенью обоснованности утверждать, что гамма-облучение в исследуемой серии плёнок изменяет прежде всего баланс между делокализованным и локализованным переносом, а различие в знаке и масштабе изменения σ отражает различную устойчивость ZnO , Cu_2O и CuO к радиационно-индуцированной перестройке дефектной подсистемы. [11, 14–21]

5. Ширина запрещённой зоны как индикатор радиационно-индуцированной перестройки дефектной подсистемы.

Изменение эффективной ширины запрещённой зоны после гамма-облучения следует рассматривать как независимый оптический маркер перестройки краёв зон и подзонных состояний. В исследуемой серии именно этот параметр позволяет проверить, согласуются ли электрические изменения с дефектной реконfigurацией электронной структуры. По данным настоящей работы после облучения наблюдается уменьшение E_g для всех трёх оксидных плёнок, однако электрическое следствие этого сдвига оказывается различным: для ZnO/Si сужение зоны сопровождается ростом проводимости, тогда как для $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}$ и CuO/Si — её ослаблением. Следовательно, определяющим оказывается не сам факт уменьшения E_g , а характер тех дефектных состояний, через которые это уменьшение реализуется.

Для ZnO/Si такая картина хорошо согласуется с современными работами по радиационно-модифицированным и кислородочувствительным плёнкам ZnO [4, 10, 14, 15, 20, 21]. В этих исследованиях уменьшение оптической щели обычно связывают с усилением вклада дефектных

состояний вблизи дна зоны проводимости и с ростом хвостов плотности состояний. Особенно показательно, что в работах по γ -облучённым плёнкам ZnO изменение E_g сопровождалось изменением концентрации носителей и перестройкой дефектного ландшафта, а не просто смещением края поглощения. Это хорошо согласуется с нашими данными: в ZnO/Si уменьшение E_g не противоречит росту проводимости, а, напротив, указывает на формирование более электронно-обогащённого и менее идеального с точки зрения дефектной упорядоченности состояния. Тем самым оптический и транспортный отклик ZnO/Si после облучения оказываются сопряжёнными проявлениями одной и той же дефектной реконфигурации.

Для $\text{Cu}_2\text{O/Si}$ физический смысл уменьшения E_g иной [2, 9, 11, 12, 16–18]. Литература по реактивно распылённым плёнкам Cu_2O показывает, что оптическая щель этого материала чувствительна к фазовой чистоте, содержанию кислорода, состоянию вакансий меди и кислорода, а также к появлению примеси CuO. При этом в работах, где удаётся понизить сопротивление и повысить дырочную подвижность, это обычно достигается не произвольным сужением зоны, а снижением общей дефектности и тонкой настройкой акцепторных состояний. Поэтому уменьшение E_g в наших облучённых плёнках $\text{Cu}_2\text{O/Si}$ следует трактовать не как признак улучшения переноса, а как маркер роста плотности локализованных состояний и подзонных хвостов. Именно это объясняет, почему в $\text{Cu}_2\text{O/Si}$ оптическое смягчение зоны сочетается не с усилением, а с деградацией дырочного транспорта: новые состояния работают здесь не как источник полезных носителей, а как каналы захвата, компенсации и рекомбинации.

Для CuO/Si связь между уменьшением E_g и ухудшением транспорта выглядит ещё более прямой [3, 6, 11, 13, 19]. Современные исследования CuO-плёнок показывают, что их оптическая щель существенно зависит от степени окисления, морфологии, процессного давления и плотности дефектов; при усилении структурной разупорядоченности и локализованных состояний край поглощения закономерно смещается в область меньших энергий. Для нашей серии это особенно важно, поскольку именно CuO/Si уже в исходном состоянии является наиболее неоднородным слоем. Поэтому дополнительное уменьшение E_g после гамма-облучения следует рассматривать как оптическое проявление усиления дефектно-локализованного режима, который в транспортном отношении соответствует росту барьерного ограничения и увеличению вклада прыжкового переноса. Иначе говоря, в случае CuO сужение зоны и падение проводимости не расходятся, а взаимно подтверждают одну и ту же тенденцию — углубление дефектно-обусловленной локализации.

Если рассматривать ZnO/Si, $\text{Cu}_2\text{O/Si}$ и CuO/Si как единую серию, то изменение E_g после облучения выявляет важную причинную линию, объединяющую оптические и электрофизические результаты. Во всех трёх системах наблюдается однотипный по знаку оптический сдвиг, однако его транспортное следствие принципиально различно. Это означает, что сама по себе величина E_g не задаёт знак электрофизического отклика; решающим становится то, как новые или усилившиеся подзонные состояния встраиваются в уже существующую электронную архитектуру конкретного материала. В ZnO/Si они, по-видимому, ближе к донорному сценарию и способствуют росту электронной концентрации, тогда как в $\text{Cu}_2\text{O/Si}$ и CuO/Si те же по знаку оптические изменения сопровождают усиление ловушечных и локализационных процессов. Именно здесь проявляется одна из наиболее сильных сторон настоящей работы: в одной серии плёнок, синтезированных в одинаковых условиях и подвергнутых одному режиму облучения, показано расщепление связи между оптическим и электрическим откликом.

С точки зрения строгой интерпретации корректно говорить прежде всего об эффективном оптическом сужении запрещённой зоны, определённом по методу Така [8], а не о полном восстановлении микроскопической зонной диаграммы. Тем не менее совместный анализ E_g , удельного сопротивления, концентрации носителей, подвижности, проводимости и морфологического состояния позволяет утверждать, что гамма-облучение изменяет в исследуемых плёнках не отдельный параметр, а всю систему связей между дефектами, локализацией и переносом. В этом смысле оптический результат выступает не как вспомогательное приложение к электрофизике, а как её независимая проверка и важное подтверждение материал-зависимой инверсии радиационного отклика в ряду $\text{ZnO/Si} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O/Si} \rightarrow \text{CuO/Si}$.

Заключение. В настоящей работе исследовано влияние гамма-облучения на электрофизические и зонные свойства тонких плёнок ZnO/Si, $\text{Cu}_2\text{O/Si}$ и CuO/Si, полученных в одинаковых технологических условиях методом магнетронного распыления. Совокупный анализ удельного сопротивления, концентрации носителей заряда, подвижности, электропроводности, морфологического состояния и ширины запрещённой зоны показал, что радиационный отклик

исследуемых оксидных систем носит выраженный материал-зависимый характер и не сводится к единому сценарию дефектообразования.

Установлено, что для плёнок ZnO/Si гамма-облучение сопровождается уменьшением удельного сопротивления и ростом электропроводности на фоне увеличения концентрации электронов при одновременном снижении их подвижности. Такое сочетание параметров указывает на то, что в данной системе радиационно-индуцированная перестройка дефектной подсистемы усиливает вклад донороподобных состояний, тогда как ухудшение подвижности связано с ростом дефектного рассеяния. Иными словами, в ZnO/Si гамма-облучение не разрушает канал электронного переноса, а переводит его в более дефектно-модифицированный режим.

Для плёнок Cu₂O/Si и CuO/Si, напротив, выявлен противоположный тип отклика: после облучения удельное сопротивление возрастает, а электропроводность уменьшается. Совместное рассмотрение этих изменений с данными по концентрации носителей, подвижности, морфологии и ширине запрещённой зоны показывает, что в медьсодержащих оксидных слоях радиационное воздействие способствует не активации проводящих состояний, а усилению локализации, росту роли ловушечных центров, рекомбинационных процессов и барьерного ограничения переноса. При этом для Cu₂O/Si реализуется промежуточный сценарий, в котором зонный вклад уже существенно ослаблен, но ещё не вытеснен полностью, тогда как для CuO/Si радиационный отклик соответствует более глубокому смещению системы в область локализованного переноса.

Показано, что изменение ширины запрещённой зоны не может интерпретироваться отдельно от транспортных характеристик. Во всех исследованных плёнках после гамма-облучения наблюдается уменьшение эффективной оптической щели, однако физический смысл этого эффекта для разных материалов различен. Для ZnO/Si сужение E_g согласуется с ростом вклада донороподобных состояний и повышением электронной концентрации, тогда как для Cu₂O/Si и CuO/Si уменьшение E_g связано, по-видимому, с увеличением плотности локализованных и ловушечных состояний, не улучшающих перенос, а, напротив, усиливающих его ограничение. Тем самым показано, что однотипный по знаку оптический сдвиг может сопровождаться принципиально разным электрическим следствием. Научная новизна работы состоит в том, что в единой серии тонких плёнок ZnO/Si, Cu₂O/Si и CuO/Si, сформированных в одинаковых технологических условиях и подвергнутых одному и тому же режиму гамма-облучения, выявлена материал-зависимая инверсия радиационного отклика. Для ZnO/Si облучение приводит к усилению электронной проводимости, тогда как для Cu₂O/Si и CuO/Si — к её ослаблению. Тем самым показано, что решающим фактором является не сам факт радиационного воздействия, а способ, которым оно перестраивает дефектную подсистему конкретной оксидной матрицы и изменяет баланс между генерацией носителей и их локализацией.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они позволяют рассматривать гамма-облучение как инструмент управляемой модификации свойств оксидных тонких плёнок, однако эффективность такого подхода принципиально различна для разных материалов. Для ZnO/Si радиационное воздействие может использоваться для направленного изменения электронной проводимости, тогда как для Cu₂O/Si и CuO/Si оно, напротив, может служить средством усиления дефектно-чувствительного отклика и повышения чувствительности к локализационным механизмам. Это открывает перспективы целенаправленного выбора оксидной матрицы в зависимости от требуемого типа электрофизического ответа в сенсорных и оптоэлектронных структурах. При этом необходимо отметить границу доказанности полученных выводов. Настоящая работа не устанавливает напрямую атомную конфигурацию каждого радиационно-индуцированного дефекта и не разделяет количественно вклад всех возможных каналов рассеяния и рекомбинации. Тем не менее совокупность экспериментальных данных позволяет обоснованно заключить, что гамма-облучение в исследуемой серии плёнок изменяет прежде всего дефектно-управляемый баланс между делокализованным и локализованным переносом, и именно это определяет различие электрофизического и оптического отклика ZnO/Si, Cu₂O/Si и CuO/Si.

ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Wang J., Chen R., Xiang L., Komarneni S. *Synthesis, properties and applications of ZnO nanomaterials with oxygen vacancies: A review* // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. P. 7357–7377. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.02.013.
2. Dolai S., Das S., Hussain S., Bhar R., Pal A.K. *Cuprous oxide (Cu₂O) thin films prepared by reactive d.c. sputtering technique* // *Vacuum*. 2017. Vol. 141. P. 296–306. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.04.033.

3. Tadjine R., Houimi A., Alim M.M., Oudini N. Oxygen flow rate effect on copper oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2022. Vol. 741. Art. 139013. DOI: 10.1016/j.tsf.2021.139013.
4. Abdallah B., Ismail A., Alahmad M., Alsabagh M. Effect of low dose-rate industrial Co-60 gamma irradiation on ZnO thin films: Structural and optical study // *Microelectronics Reliability*. 2020. Vol. 104. Art. 113556. DOI: 10.1016/j.microrel.2019.113556.
5. Kabacelik I., Kutaruk H., Yaltkaya S., Sahin R. Gamma irradiation induced effects on transparent conducting oxide thin films // *Radiation Physics and Chemistry*. 2017. Vol. 134. P. 89–92. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2017.01.042.
6. Sarker P., Sen S.K., Mia M.N.H. et al. Effect of gamma irradiation on structural, morphological and optical properties of thermally deposited CuO thin films // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. No. 3. P. 3367–3375. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.211.
7. Kern W., Puotinen D.A. Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology // *RCA Review*. 1970. Vol. 31. No. 2. P. 187–206.
8. Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium // *physica status solidi (b)*. 1966. Vol. 15. No. 2. P. 627–637. DOI: 10.1002/pssb.19660150224.
9. Zhu H., Zhang J., Li C., Pan F., Wang T., Huang B. Cu₂O thin films deposited by reactive direct current magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2009. Vol. 517. No. 19. P. 5700–5704. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.02.127.
10. Zainabidinova S.S., Tursunov O.N., Yodgorov N.B. Effect of γ -Irradiation on Structure and Electrophysical Properties of S-Doped ZnO Films // *Eastern European Journal of Physics*. 2024. No. 2. P. 131–138. DOI: 10.26565/2312-4334-2024-2-15.
11. Zhao M.-J., Huang J., Li H.-C., Li H.-P., Chen W.-J., Lien S.-Y. Crystal phase control of copper oxide thin films by process pressure during high power impulse magnetron sputtering // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2024. Vol. 9. No. 2. Art. 100672. DOI: 10.1016/j.jsamd.2024.100672.
12. Rezek J., Koloros J., Houška J., Čerstvý R., Haviar S., Kolenatý D., Damte J.Y., Baroch P. Ultra-low-resistivity nitrogen-doped p-type Cu₂O thin films fabricated by reactive HiPIMS // *Applied Surface Science*. 2025. Vol. 714. Art. 164380. DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.164380.
13. Al-Jubbori M.A., Ajaj K.A., Abdullah M.M., Taha N.S. Effect of gamma and ultraviolet irradiation on the optical properties of copper oxide nanostructured thin films by chemical spray pyrolysis // *Radiation Physics and Chemistry*. 2025. Vol. 226. Art. 112190. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2024.112190.
14. Novák P., Nedvědová L., Kozák T., Šotová P., Hromádka L. et al. Investigation of carrier transport in ZnO and ZnO:Al thin films sputtered at different oxygen conditions // *Thin Solid Films*. 2023. Vol. 780. Art. 139942. DOI: 10.1016/j.tsf.2023.139942.
15. Muthusamy S. et al. Effect of Deposition Temperature on Zn Interstitials and Oxygen Vacancies in ZnO Thin Films // *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 21. Art. 5153. DOI: 10.3390/ma17215153.
16. Rezek J., Kucera M., Kozak T., Čerstvy R., Franc A., Baroch P. Enhancement of hole mobility in high-rate reactively sputtered Cu₂O thin films induced by laser thermal annealing // *Applied Surface Science*. 2024. Vol. 664. Art. 160255. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160255.
17. Sekkat A., Nguyen V.H., Masse C. et al. Open-air printing of Cu₂O thin films with high hole mobility for semitransparent solar harvesters // *Communications Materials*. 2021. Vol. 2. Art. 78. DOI: 10.1038/s43246-021-00181-8.
18. Lee H.-J., Lee G.-H., Lee H.-W. et al. Effects of Postdeposition Annealing on the Electrical Properties of Cu₂O/4H-SiC PiN Diodes // *physica status solidi (a)*. 2024. Vol. 221. No. 23. Art. 2400018. DOI: 10.1002/pssa.202400018.
19. Prakash A., Mishra V., Mahesha M.M.G. Probing intrinsic defects of aluminium-doped CuO thin films for solar cell applications // *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 35184–35197. DOI: 10.1039/D4RA06413E.
20. Benamara M., Hjiri M., Jbeli A., Ben Moussa S., Althumairi N.A., Aldukhayel A.M., Alzahrani A.Y.A., Teixeira S.S., Valente M.A., Dahman H., Dhahri E. Tailoring electrical and dielectric properties of ZnO thin films via oxygen vacancy engineering: evidence from impedance and spectroscopic analyses // *Inorganic Chemistry Communications*. 2025. Vol. 182. Art. 115401. DOI: 10.1016/j.inoche.2025.115401.
21. Remeš Z., Hubička Z., Hubík P. Optical and Transport Properties of ZnO Thin Films Prepared by Reactive Pulsed Mid-Frequency Sputtering Combined with RF ECWR Plasma // *Nanomaterials*. 2025. Vol. 15. No. 8. Art. 590. DOI: 10.3390/nano15080590.

UO'K 1.37.50.53

YERGA XAVF SOLUVCHI KICHIK SAYYORALARNING STATISTIK TAHLILI

Nomozova Dilnoza Mamarajab qizi,

Shahrisabz davlat pedagogika instituti "Tabiiy fanlar" kafedrası v.b.dotsenti, PhD

nomozova23@mail.com

ORCID: 0009-0002-9330-9287

Buxarova Sitora Baxriddin qizi,

Shahrisabz davlat pedagogika instituti magistranti

sitorabuxarova339@gmail.com

Mazkur ilmiy maqolada Yerga xavf soluvchi kichik sayyoralar — ya'ni Near-Earth Objects (NEO)larning statistik xususiyatlari, orbital parametrlarining taqsimoti, diametr bo'yicha tuzilishi hamda Yer bilan to'qnashish ehtimollari zamonaviy astronomik ma'lumotlar asosida tahlil qilinadi. Tadqiqotda NASA CNEOS, ESA NEO Coordination Centre va Minor Planet Center tomonidan taqdim etilgan ochiq statistik bazalar asosiy manba sifatida ishlatildi. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, NEOlarning asosiy qismi kichik o'lchamli jismlardan iborat bo'lib, ular ko'pincha Yer atmosferasida parchalanadi yoki xavfsiz masofada o'tib ketadi. Biroq diametri 1 km dan ortiq bo'lgan kam sonli obyektlar global miqyosdagi ekologik va ijtimoiy oqibatlariga sabab bo'lishi mumkin. Maqolada shuningdek, Torino va Palermo shkalalari asosida xavf darajalarini baholash mexanizmlari hamda kosmik monitoring tizimlarining samaradorligi ilmiy asosda yoritilgan. Olingan natijalar Yerga yaqin obyektlarni erta aniqlash va kuzatish kosmik xavfsizlikni ta'minlashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega ekanini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: kichik sayyoralar, Yerga yaqin obyektlar, NEO, asteroidlar, statistik tahlil, kosmik xavfsizlik, orbital parametrlar, monitoring tizimlari.

STATISTICAL ANALYSIS OF SMALL PLANETS THREATENING THE EARTH

This scientific article analyzes the statistical characteristics of Near-Earth Objects (NEOs), including the distribution of their orbital parameters, size composition, and the probabilities of collision with Earth based on modern astronomical data. The study primarily utilizes open-access statistical databases provided by NASA CNEOS, ESA NEO Coordination Centre, and the Minor Planet Center. The analysis shows that most NEOs are small bodies that typically burn up in Earth's atmosphere or pass at a safe distance. However, a small number of objects with diameters exceeding 1 km may cause global ecological and social consequences. The article also discusses risk assessment mechanisms based on the Torino and Palermo scales, as well as the effectiveness of space monitoring systems. The results indicate that the early detection and monitoring of Near-Earth Objects play a crucial scientific and practical role in ensuring space safety.

Keywords: small planets, Near-Earth Objects, NEOs, asteroids, statistical analysis, space safety, orbital parameters, monitoring systems.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАЛЫХ ПЛАНЕТ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИХ УГРОЗУ
ЗЕМЛЕ

В данной научной статье анализируются статистические характеристики малых планет, представляющих угрозу Земле, то есть околоземных объектов (Near-Earth Objects, NEO), распределение их орбитальных параметров, структура по диаметру, а также вероятности столкновения с Землёй на основе современных астрономических данных. В исследовании в качестве основных источников использовались открытые статистические базы данных NASA CNEOS, Центра координации NEO Европейского космического агентства (ESA NEO Coordination Centre) и Minor Planet Center. Анализ показывает, что основная часть NEO состоит из небольших объектов, которые чаще всего разрушаются в атмосфере Земли или проходят на безопасном расстоянии. Однако редкие объекты диаметром более 1 км могут вызвать глобальные экологические и социальные последствия. В статье также научно обоснованы механизмы оценки уровня опасности на основе шкал Торино и Палермо, а также эффективность систем космического мониторинга. Полученные результаты показывают, что раннее обнаружение и наблюдение околоземных объектов имеет важное научно-практическое значение для обеспечения космической безопасности.

Ключевые слова: *малые планеты, околоземные объекты, NEO, астероиды, статистический анализ, космическая безопасность, орбитальные параметры, системы мониторинга.*

Kirish. Insoniyat tarixida osmon jismlarining harakati doimo ilmiy qiziqish uyg'otib kelgan. Ayniqsa Quyosh tizimidagi asteroidlar, kometalar va meteoroidlar orasida Yer orbitasiga yaqinlashuvchi obyektlar alohida e'tibor talab qiladi. Bunday jismlar ilmiy adabiyotlarda Near-Earth Objects (NEO) deb ataladi va ularning orbitasi Quyoshdan 1,3 astronomik birlik (AB) masofadan kam bo'lgan hududdan o'tadi. Mazkur obyektlarning ayrimlari Yer orbitasini kesib o'tadi yoki unga juda yaqinlashadi, bu esa potensial xavf tug'diradi.

XX asr oxiri va XXI asr boshlarida kuzatuv texnologiyalarining jadal rivojlanishi natijasida Yerga yaqin asteroidlar soni keskin oshib bormoqda. NASA va ESA ma'lumotlariga ko'ra, 2000-yillar boshida aniqlangan NEOlari soni 4 ming atrofida bo'lsa, bugungi kunga kelib ularning umumiy soni 30 mingdan oshdi. Ushbu o'sish real xavfning ortganini emas, balki kuzatuv imkoniyatlarining kengayganini anglatadi. Shu bilan birga, diametri 140 metr va undan katta bo'lgan asteroidlar potensial xavfli obyektlar (Potentially Hazardous Asteroids — PHA) sifatida baholanadi.

Katta o'lchamli asteroidlar Yer bilan to'qnashgan taqdirda mintaqaviy yoki global ekologik falokatlariga olib kelishi mumkin. Tarixda bunday hodisalarning izlari mavjud bo'lib, eng mashhuri taxminan 66 million yil avval sodir bo'lgan Chicxulub zarbasi bo'lib, u dinozavrlarning qirilib ketishiga sabab bo'lgan deb hisoblanadi. Zamonaviy davrda esa 1908-yilda Sibirning Tunguska hududida sodir bo'lgan portlash kichikroq obyektlarning ham katta energiya chiqarishi mumkinligini ko'rsatdi.

Shu sababli bugungi kunda NEOlarni aniqlash, ularning orbital harakatini modellashtirish, to'qnashish ehtimolini baholash va ehtimoliy xavfni kamaytirish choralari ishlab chiqish kosmik xavfsizlik sohasining muhim yo'nalishiga aylangan. Mazkur maqolaning asosiy maqsadi Yerga xavf soluvchi kichik sayyoralarning statistik xususiyatlarini kompleks tahlil qilish, ularning o'lcham taqsimoti, orbital parametrlarini baholash hamda zamonaviy monitoring tizimlarining samaradorligini ilmiy asosda ko'rsatishdan iborat.

Tadqiqot obyekti va metodlari: Mazkur tadqiqot obyekti sifatida Yerga yaqin orbitada harakatlanuvchi asteroidlar va ayrim hollarda kometalar tanlab olindi. Tadqiqotda asosan quyidagi xalqaro ochiq ma'lumotlar bazalaridan foydalanildi:

NASA Center for Near-Earth Object Studies (CNEOS);

European Space Agency (ESA) NEO Coordination Centre;

International Astronomical Union huzuridagi Minor Planet Center (MPC).

Ushbu manbalar NEOlarning orbital elementlari, diametri, kashf etilgan sanasi, yaqinlashish masofalari va xavf baholash ko'rsatkichlari haqida batafsil statistik ma'lumotlarni taqdim etadi.

NEOlari orbital parametrlariga ko'ra uch asosiy guruhga ajratildi:

Aten guruhi — yarim katta o'qi 1 AB dan kichik bo'lgan va Yer orbitasini kesib o'tuvchi asteroidlar;

Apollon guruhi — yarim katta o'qi 1 AB dan katta bo'lsa-da, Yer orbitasini kesib o'tuvchi asteroidlar;

Amor guruhi — Yer orbitasiga juda yaqinlashuvchi, ammo uni kesib o'tmaydigan asteroidlar.

Tadqiqot jarayonida quyidagi ilmiy metodlardan foydalanildi:

Statistik tahlil metodi — obyektlar soni, diametri, orbital elementlari va yaqinlashish chastotalarini baholash uchun;

Taqqoslash metodi — turli guruhlariga mansub asteroidlarning xavf darajasini solishtirish uchun;

Matematik modellashtirish — asteroidlarning orbital harakatini bashorat qilish uchun;

Grafik va foizli tahlil — obyektlar taqsimotining vizual ko'rinishini aniqlash uchun;

Risk baholash metodi — Torino va Palermo shkalalari asosida xavf darajalarini aniqlash uchun.

Ushbu metodlar majmuasi NEOlarning fizik va orbital xususiyatlarini chuqurroq tahlil qilish hamda kosmik xavfsizlik tizimlarining samaradorligini baholash imkonini berdi.

Yerga yaqin obyektlarning umumiy statistik tavsifi:

NEOlari sonining o'sish dinamikasi. So'nggi yigirma yil davomida Yerga yaqin asteroidlar soni barqaror sur'atlarda oshib bormoqda. NASA CNEOS statistik ma'lumotlariga ko'ra, 2003-yilda aniqlangan NEOlari soni taxminan 4 mingta bo'lgan bo'lsa, 2010-yilda bu ko'rsatkich 8 mingdan oshgan, 2020-yilga kelib esa 23 mingdan ortgan. 2024-yil yakunlariga ko'ra, ro'yxatga olingan NEOlari soni 30 mingdan oshdi.

Har yili o'rtacha 2000–3000 ta yangi obyekt aniqlanmoqda. Bu o'sish quyidagi omillar bilan izohlanadi:

optik va infraqizil teleskoplarining sezgirligi oshgani;

avtomatlashtirilgan kuzatuv tizimlari keng joriy etilgani;

sun'iy intellekt asosidagi obyekt aniqlash algoritmlarining ishlab chiqilgani;

Yerga yaqin fazoni kuzatishga ixtisoslashgan maxsus dasturlar (Pan-STARRS, ATLAS, Catalina Sky Survey, NEOWISE) faoliyatining kengaygani.

Statistik tahlillar shuni ko'rsatadiki, aniqlashlar sonining oshishi real xavfning ortganini emas, balki osmon fazosini kuzatish imkoniyatlarining sezilarli darajada yaxshilanganini anglatadi.

Diametr bo'yicha taqsimot:

NEOlarning diametr bo'yicha taqsimoti keskin notekis bo'lib, ularning asosiy qismi kichik o'lchamli jismlardan iborat. NASA va ESA ma'lumotlariga ko'ra:

70–75% NEOlarning diametri 100 metrga yetmaydi;

20–25% obyektlar 100–500 metr oralig'ida;

taxminan 4–5% obyektlar diametri 1 km dan katta bo'lgan jismlardan iborat.

Diametri 10–20 metr bo'lgan jismlar Yer atmosferasiga kirganda ko'pincha parchalanib ketadi va jiddiy zarar yetkazmaydi. Masalan, 2013 yilda Rossiyaning Chelyabinsk shahri ustida sodir bo'lgan hodisa taxminan 17 metr diametrli obyekt bilan bog'liq bo'lib, u atmosferada portlab, asosan oynalarning sinishiga olib kelgan, biroq global oqibatlarga sabab bo'lmagan.

Biroq diametri 100 metr va undan katta bo'lgan asteroidlar Yer bilan to'qnashgan taqdirda mintaqaviy miqyosdagi vayronagarchiliklarga olib kelishi mumkin. Diametri 1 km dan katta asteroidlar esa global iqlim o'zgarishlari, biosferaning izdan chiqishi va jiddiy ekologik oqibatlarga sabab bo'lishi ehtimoli yuqori bo'lgan obyektlar hisoblanadi. Shu sababli aynan ushbu toifadagi obyektlar kosmik xavfsizlik tizimlarida ustuvor nazorat ostiga olinadi.

Kichik sayyoralarning orbital xususiyatlari:

NEOlarning orbital harakati murakkab va xilma-xil bo'lib, ularning ko'pchiligi elliptik orbitalarga ega. Statistik tahlillar asosida quyidagi umumiy xulosalar chiqarildi:

Ekssentrisitet qiymatlari asosan 0,2–0,7 oralig'ida bo'ladi, bu esa orbitaning cho'ziqlik darajasi yuqori ekanini ko'rsatadi;

Inklinatsiya burchaklari 0° dan 35° gacha bo'lgan diapazonda joylashadi, bu asteroidlarning Quyosh sistemasining tekisligiga nisbatan turlicha joylashganini bildiradi;

Orbital davrlar odatda 0,5 yildan 5 yilgacha bo'lib, ba'zi obyektlar Yer orbitasini yiliga bir necha marta kesib o'tishi mumkin.

Ayniqsa Apollon va Aten guruhiga mansub asteroidlar Yer orbitasini kesib o'tuvchi obyektlar bo'lgani sababli to'qnashuv nuqtai nazaridan xavfli hisoblanadi. Amor guruhi asteroidlari esa Yer orbitasiga juda yaqinlashsa-da, uni kesib o'tmaydi, ammo uzoq muddatli orbital evolyutsiya natijasida ularning orbitasi o'zgarishi ehtimoli mavjud.

Gravitatsion ta'sirlar, xususan Yupiter va Mars kabi sayyoralarning perturbatsiyalari, shuningdek Yarkovskiy effekti kabi issiqlik ta'siriga asoslangan kuchlar asteroidlarning uzoq muddatli orbital evolyutsiyasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Bu holat NEOlarning harakatini prognozlashni murakkablashtiradi va doimiy kuzatuvlarni zarur qiladi.

Minimal yaqinlashish masofasi (MOID) va potensial xavf:

Minimal orbitaviy kesish masofasi (Minimum Orbit Intersection Distance — MOID) Yer orbitasi bilan asteroid orbitasi orasidagi eng kichik masofani bildiradi. Agar MOID qiymati 0,05 astronomik birlikdan kichik bo'lsa va obyektning diametri taxminan 140 metr yoki undan katta bo'lsa, u potensial xavfli asteroid (PHA) sifatida tasniflanadi.

Statistik ma'lumotlarga ko'ra:

- NEOlarning taxminan 10–12% i PHA toifasiga kiradi;
- Ularning katta qismi Yerga xavfsiz masofada o'tib ketadi;
- Juda oz qismi yaqin kelajakda ehtimoliy xavf tug'diruvchi obyekt sifatida baholanadi.

NASA CNEOS ma'lumotlariga ko'ra, hozirgi kunga qadar aniqlangan obyektlar orasida Yer bilan yaqin kelajakda to'qnashish ehtimoli yuqori bo'lgan obyekt mavjud emas. Biroq bu natija monitoring tizimlarining doimiy ishlashi va orbital parametrlarning muntazam yangilanib borishi natijasida qo'lg'a kiritilmoqda.

Tahlil va natijalar. Yer bilan to'qnashish ehtimollarining statistik bahosi:

Ilmiy hisob-kitoblarga asoslanib, asteroidlar bilan to'qnashuv chastotasi ularning diametriga bog'liq holda baholanadi:

Diametri 10 metr atrofidagi jismlar Yer atmosferasiga har bir necha yilda kirib keladi;

Diametri 50–100 metr bo'lgan obyektlar taxminan 100–200 yilda bir marta;

Diametri 1 km dan katta asteroidlar esa bir necha million yilda bir marta Yer bilan to'qnashishi mumkin.

Ushbu statistik natijalar yirik obyektlar bilan to'qnashuv ehtimoli juda past ekanini ko'rsatsa-da, ularning potentsial oqibatlari nihoyatda jiddiy bo'lishi mumkin. Shu sababli zamonaviy kosmik xavfsizlik tizimlarida ehtimollik past bo'lsa ham, yuqori oqibatli hodisalarga tayyorgarlik ustuvor vazifa sifatida qaraladi.

Torino va Palermo shkalalari asosida baholash:

Asteroidlarning xavf darajasini baholashda keng qo'llaniladigan ikki asosiy tizim mavjud:

Torino shkalasi — 0 dan 10 gacha bo'lgan ballarda xavf darajasini ifodalaydi. 0 ball obyekt Yer uchun xavf tug'dirmasligini, 10 ball esa muqarrar global falokatni bildiradi. Aksariyat aniqlangan asteroidlar 0 yoki 1 ball darajasida baholanadi.

Palermo shkalasi — ehtimollik va chiqariladigan energiyani matematik asosda birlashtirgan logarifmik ko'rsatkich bo'lib, obyekt xavfining fon darajasiga nisbatan qanchalik yuqori ekanini ifodalaydi.

Hozirgi statistik ma'lumotlarga ko'ra, aniqlangan NEOlarning deyarli barchasi Torino shkalasi bo'yicha 0 darajaga ega bo'lib, yaqin kelajakda real xavf mavjud emas. Biroq bu natija monitoring tizimlarining uzluksiz ishlashi va orbital hisob-kitoblarning aniqligi natijasidir.

Kosmik monitoring tizimlarining roli:

Yerga xavf soluvchi kichik sayyoralar aniqlash va kuzatishda zamonaviy monitoring tizimlari muhim rol o'ynaydi. Bugungi kunda asosiy xalqaro kuzatuv dasturlariga quyidagilar kiradi:

Pan-STARRS (AQSh) — keng ko'lamli osmon kuzatuvlari orqali NEOlarni aniqlashga ixtisoslashgan tizim;

Catalina Sky Survey (AQSh) — Yerga yaqin asteroidlarni erta aniqlash bo'yicha yetakchi dasturlardan biri;

ATLAS — tezkor xavfli obyektlarni aniqlash va ogohlantirishga mo'ljallangan tizim;

NEOWISE — infraqizil diapazonda asteroidlarning o'lchami va albedosini aniqlash imkonini beruvchi kosmik observatoriya.

Mazkur tizimlar yordamida hozirgi kunda diametri 1 km dan katta asteroidlarning 90% dan ortig'i aniqlangan. Bu kosmik xavfsizlikni ta'minlash yo'lidagi muhim yutuq hisoblanadi. Bundan tashqari, radar kuzatuvlari yordamida asteroidlarning shakli, aylanish tezligi va yuzasining tuzilishi haqida qo'shimcha ma'lumotlar olinmoqda.

O'zbekiston hududida ham astronomik kuzatuvlar rivojlanib bormoqda. O'zbekiston Fanlar akademiyasi huzuridagi Ulug'bek nomidagi Astronomiya instituti hamda Maydanak observatoriyasida kichik sayyoralar va boshqa osmon jismlarini kuzatish bo'yicha ilmiy ishlar olib borilmoqda. Bu tadqiqotlar global monitoring tizimlariga integratsiyalashgan holda amalga oshirilmoqda va xalqaro ma'lumotlar bazalariga kiritilmoqda.

Asteroidlarni og'dirish va xavfni kamaytirish texnologiyalari:

So'nggi yillarda asteroidlarning Yer bilan to'qnashish ehtimolini kamaytirish bo'yicha faol ilmiy-amaliy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda asosiy e'tibor asteroidlarning orbitasini o'zgartirish texnologiyalarini ishlab chiqishga qaratilgan.

NASA tomonidan 2022-yilda amalga oshirilgan DART (Double Asteroid Redirection Test) missiyasi kichik asteroidning yo'ldoshiga kosmik apparatni urdirish orqali uning orbital davrini o'zgartirish mumkinligini amalda isbotladi. Ushbu tajriba asteroidlarni kinetik zarba orqali og'dirish usuli samarali ekanini ko'rsatdi.

Bundan tashqari, quyidagi yondashuvlar ham ilmiy adabiyotlarda muhokama qilinmoqda:

Gravitatsion traktor — kosmik apparat asteroid yonida uzoq muddat turib, o'zining tortish kuchi orqali uning orbitasini sekin o'zgartirishi mumkin;

Yuzani bug'lantirish (ablation) — lazer yoki boshqa energiya manbalari yordamida asteroid yuzasidan moddani bug'lantirib, reaktiv kuch hosil qilish orqali yo'nalishni o'zgartirish;

Yadro energiyasidan foydalanish — faqat favqulodda holatlarda, katta obyektlar uchun mo'ljallangan usul sifatida qaraladi.

Ushbu texnologiyalar hozircha tajriba bosqichida bo'lsa-da, ular kosmik xavfsizlikni ta'minlashda muhim strategik ahamiyatga ega.

Statistik modellash va bashorat qilish imkoniyatlari:

Asteroidlarning kelajakdagi harakatini prognozlashda statistik modellar va raqamli simulyatsiyalar muhim rol o'ynaydi. Zamonaviy orbital hisob-kitoblar Nyuton mexanikasi va relativistik tuzatmalar asosida amalga oshiriladi.

Bundan tashqari, Yarkovskiy effekti kabi noan'anaviy kuchlar ham hisobga olinadi.

Statistik modellash tirish yordamida asteroidlarning:

Yer orbitasiga yaqinlashish vaqti;

minimal yaqinlashish masofasi;

to'qnashish ehtimoli;

ehtimoliy zarba energiyasi

oldindan baholanadi. Ushbu ma'lumotlar asosida kosmik xavfsizlik tizimlari tomonidan tezkor qarorlar qabul qilinadi va zarur hollarda ehtiyot choralarini ishlab chiqish mumkin bo'ladi.

Sun'iy intellekt va mashinaviy o'rganish algoritmlarining qo'llanilishi asteroidlarni aniqlash va ularning harakatini prognozlash aniqligini sezilarli darajada oshirdi. Masalan, zamonaviy algoritmlar fon yulduzlari orasida juda xira obyektlarni aniqlash imkonini berib, yangi NEOlarning erta kashf etilishiga xizmat qilmoqda.

Xalqaro hamkorlik va kosmik xavfsizlik siyosati:

Yerga xavf soluvchi kichik sayyoralar muammosi global xarakterga ega bo'lib, uni alohida bir davlat doirasida hal etish mumkin emas. Shu sababli kosmik xavfsizlik sohasida xalqaro hamkorlik muhim ahamiyatga ega.

Xulosa va takliflar. Bugungi kunda NASA, ESA, JAXA va boshqa kosmik agentliklar o'rtasida ma'lumot almashinuvi yo'lga qo'yilgan. Birlashgan Millatlar Tashkiloti huzurida faoliyat yurituvchi International Asteroid Warning Network (IAWN) va Space Mission Planning Advisory Group (SMPAG) tashkilotlari asteroid xavfini monitoring qilish va favqulodda holatlarda xalqaro choralar ko'rish mexanizmlarini ishlab chiqishda muhim rol o'ynaydi. O'zbekiston olimlari ham xalqaro astronomik hamjamiyat bilan hamkorlikda kuzatuvlar olib borib, olingan ma'lumotlarni global bazalarga kiritmoqda. Bu esa mamlakatimizning kosmik xavfsizlik sohasidagi ilmiy hissasini oshirishga xizmat qilmoqda.

Olib borilgan statistik tahlillar shuni ko'rsatadiki, Yerga yaqin kichik sayyoralar populyatsiyasining asosiy qismi kichik o'lchamli jismlardan iborat bo'lib, ular odatda jiddiy xavf tug'dirmaydi. Biroq diametri 1 km dan ortiq bo'lgan kam sonli obyektlar global miqyosdagi oqibatlariga sabab bo'lishi mumkin. Shu bois zamonaviy kosmik xavfsizlik tizimlarida aynan yirik obyektlarni erta aniqlash va ularning orbital harakatini aniq prognozlash ustuvor vazifa sifatida qaralmoqda.

Statistik modellash tirish natijalari monitoring tizimlarining samaradorligini tasdiqlaydi. Diametri 1 km dan katta asteroidlarning 90% dan ortig'i allaqachon aniqlangan bo'lib, bu ehtimoliy global xavfni sezilarli darajada kamaytiradi. Shu bilan birga, o'rta va kichik o'lchamli obyektlarni aniqlash darajasi ham yildan-yilga oshib bormoqda.

Shuningdek, asteroidlarni og'dirish texnologiyalarining rivojlanishi kosmik xavfsizlikni ta'minlash yo'lida yangi imkoniyatlar yaratmoqda. DART missiyasining muvaffaqiyati nazariy modellarning amaliy tasdig'i bo'lib, kelajakda bunday texnologiyalarni real xavf yuzaga kelganda qo'llash imkonini kengaytiradi.

Mazkur ilmiy maqolada Yerga xavf soluvchi kichik sayyoralarning statistik xususiyatlari, diametr bo'yicha taqsimoti, orbital parametrlarining o'ziga xosliklari va Yer bilan to'qnashish ehtimollari zamonaviy ilmiy ma'lumotlar asosida tahlil qilindi. Tadqiqot natijalariga ko'ra:

Yerga yaqin obyektlar soni yil sayin ortib bormoqda, biroq bu real xavfning oshishini emas, balki aniqlash texnologiyalarining rivojlanganini ko'rsatadi.

NEOlarning asosiy qismi kichik o'lchamli bo'lib, ularning faqat 4–5% ga yaqini diametri 1 km dan katta obyektlardan iborat.

Potensial xavfli asteroidlar umumiy populyatsiyaning taxminan 10–12% ini tashkil etadi.

Zamonaviy monitoring tizimlari va statistik modellash tirish usullari yordamida asteroidlarning Yerga yaqinlashishi oldindan aniqlanib, xavf darajasi baholanmoqda.

Asteroidlarni og'dirish texnologiyalarining rivojlanishi kosmik xavfsizlikni ta'minlashda istiqbolli yo'nalish hisoblanadi.

Shunday qilib, Yerga yaqin kichik sayyoralarni statistik tahlil qilish kosmik xavfsizlikni ta'minlashda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi. Kelgusida ushbu sohada tadqiqotlarni yanada chuqurlashtirish, kuzatuv texnologiyalarini takomillashtirish va xalqaro hamkorlikni kengaytirish muhim ahamiyat kasb etadi.

ADABIYOTLAR:

1. Chesley, S. R., & Milani, A. (2018). *Near-Earth object risk assessment*. Cambridge University Press.

2. European Space Agency. (2023). *Near-Earth object coordination centre: Planetary defence activities*. ESA Publications.
3. Harris, A. W., & D'Abramo, G. (2015). *The population of near-Earth asteroids*. *Icarus*, 257, 302–312. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.05.004>
4. Mainzer, A., Bauer, J., Cutri, R. M., Grav, T., Masiero, J., & Wright, E. (2011). *NEOWISE observations of near-Earth objects: Preliminary results*. *The Astrophysical Journal*, 743(2), 156. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/156>
5. Minor Planet Center. (2024). *Near-Earth object statistics and orbital data*. International Astronomical Union. <https://minorplanetcenter.net>
6. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). *Finding hazardous asteroids using infrared and visible wavelength telescopes*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25459>
7. NASA Center for Near-Earth Object Studies. (2024). *Near-Earth object discovery statistics*. Jet Propulsion Laboratory. <https://cneos.jpl.nasa.gov>
8. Ulug'bek nomidagi Astronomiya instituti. (2022). *Kichik sayyoralar va kosmik jismlar harakatini kuzatish bo'yicha ilmiy hisobotlar. O'zbekiston Fanlar akademiyasi nashriyoti*.
9. Yeomans, D. K. (2013). *Near-Earth objects: Finding them before they find us*. Princeton University Press.

UDK 621.315.592:548.4:539.2

UGLEVOD ATOMLARINING KREMNIY MONOKRISTALLARIDA KISLOROD
KOMPLEKSLARINING HOL BO'LISHIGA TA'SIRI

Mamarasulova Hanifa Dilshod qizi,
O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi
Nanotexnologiyalarni rivojlantirish markazi
mamarasulovahanifa2@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotning maqsadi sanoat sharoitida kremniy monokristallarini o'stirish jarayonida uglerod atomlarining kislorod komplekslarining hosil bo'lishi jarayoniga ta'sirini o'rganishdir. Czochralski usuli yordamida dislokatsiyasiz kremniy monokristallarini o'stirish jarayonida aralashmalar konsentratsiyasi nisbatini o'zgartirish uglerod atomlarining aralashmalar komplekslarini hosil qilishdagi ishtirokini oshirishi aniqlandi.

Kalit so'zlar: uglerod, kristallanish, Czochralski usuli, Monokristall kremniy, kimyoviy reaksiyalar.

EFFECT OF CARBON ATOMS ON THE FORMATION OF OXYGEN COMPLEXES IN
SILICON SINGLE CRYSTALS

Abstract. The aim of this study is to study the effect of carbon atoms on the formation of oxygen complexes during the growth of silicon single crystals under industrial conditions. It was found that changing the concentration ratio of impurities during the growth of dislocation-free silicon single crystals using the Czochralski method increases the participation of carbon atoms in the formation of impurity complexes.

Keywords: carbon, crystallization, Czochralski method, Single crystal silicon, chemical reactions.

ВЛИЯНИЕ АТОМОВ УГЛЕРОДА НА ОБРАЗОВАНИЕ КИСЛОРОДНЫХ
КОМПЛЕКСОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Аннотация. Целью данного исследования является изучение влияния атомов углерода на образование кислородных комплексов в процессе выращивания монокристаллов кремния в промышленных условиях. Установлено, что изменение соотношения концентраций примесей в процессе выращивания бездислокационных монокристаллов кремния методом Чохральского увеличивает участие атомов углерода в образовании примесных комплексов.

Ключевые слова: углерод, кристаллизация, метод Чохральского, монокристаллический кремний, химические реакции.

Kirish. Global mikroelektronika sanoati Czochralski usuli yordamida eritma o'sishi orqali kremniy monokristallarini ishlab chiqaradi. Czochralski usuli - bu eritmadan doimiy ravishda aralashmalarni ajratib olish va unda monokristal o'stirishni o'z ichiga olgan eritmadan yo'naltirilgan kristallanish usuli hisoblanadi. Kremniy eritmasi kvarts tigeligga joylashtiriladi. Monokristal o'sishi inert argon atmosferasida sodir bo'ladi. Kerakli issiqlik sharoitlarini yaratish uchun rezistiv isitish manbai - grafit isitgich ishlatiladi. Monokristallarni o'stirish uchun ishlatiladigan issiqlikni to'plash uchun mos grafit qalqonidan ham foydalaniladi.

Monokristall kremniy eng sof zamonaviy materiallardan biridir. Uning nazoratsiz aralashma konsentratsiyasi 10-9% dan kam, ammo Czochralski usuli yordamida o'stirish jarayonida kremniy monokristallari ikkita fon aralashmasi: kislorod va uglerod bilan ifloslanadi [1-3]. Monokristalldagi bu aralashmalarining asosiy manbai boshlang'ich material (yarimo'tkazgichli polikristalli kremniy) hisoblanadi. Qo'shimcha manbalarga kvarts tigeling qisman erishi natijasida eritmaga kiritilgan kislorod va eritish kamerasining grafit uskunalari tomonidan chiqarilgan chang va gazsimon oksidlar ko'rinishidagi uglerod kiradi. Zamonaviy talablarga muvofiq, mikrosxemalar uchun kremniyning monokristallaridagi kislorod miqdori 10^{18} sm^{-3} dan oshmasligi kerak. (0,002 %), va uglerod miqdori 10^{16} sm^{-3} dan oshmasligi kerak (0.05%) [1]. Fon aralashmalarining ikkalasi ham – kislorod ham, uglerod ham – monokristalli kremniyda komplekslanish jarayonlarida ishtirok etadi [2-4]. Elektronika uchun mo'ljallangan kremniy monokristallarining strukturaviy yaxlitligini oshirish ularni ishlab chiqarishning dolzarb muammolaridan

biridir. Ushbu ishning maqsadi sanoat ishlab chiqarish sharoitida kremniy monokristallarini o'stirish jarayonida uglerod atomlarining kompleks hosil bo'lishiga ta'sirini o'rganishdir.

Monokristalli kremniydagi uglerod. Czochralski qurilmasining issiqlik zonasining katta qismi grafitdan iborat. Natijada, uglerod eritmaning va natijada kristallning ifloslanish manbai hisoblanadi. Asosiy ifloslanish yo'li gaz fazasi orqali, uglerod oksidi (CO) orqali o'tadi. CO eritmaning erkin yuzasiga yetib boradi, u yerda u so'riladi va eritma orqali tashiladi. Si eritmasida C ning eruvchanligi $5 \cdot 10^{-18}$ atom/sm³ ni tashkil qiladi [5]. Uglerod (C) Si kristaliga $k = 0,07$ taqsimot koeffitsienti bilan kiritiladi, bu o'sish chegarasi oldida uglerodning kuchli to'planishini anglatadi. Shuning uchun eritmadagi uglerod konsentratsiyasini SiC₂ ning bir hil yadrolanish chegarasidan pastroqda saqlash muhimdir. Aks holda, o'sish chegarasiga kiradigan SiC zarralari strukturaning yo'qolishiga olib kelishi mumkin. Uglerod konsentratsiyasining pastligini saqlab qolishning yana bir sababi shundaki, Si tarkibidagi uglerod namunadagi mikrodefektlarning fizikaviy xususiyatlarini o'zgartirishi mumkin [6].

Gaz atmosferasida CO ning mavjudligi eritmadan bug'lanib ketadigan SiO va grafit komponentlari o'rtasidagi kimyoviy reaksiyalar (past haroratlarda), shuningdek, kvarts tigel va uning atrofidagi grafit tigel tayanchi o'rtasidagi reaksiyalar (yuqori haroratlarda) [7] va qoldiq kislorodning grafit bilan reaksiyaga kirishishi natijasida yuzaga keladi. Bu reaksiyalar, shuningdek, issiq zonada grafit komponentlarida Si yoki SiC komplekslarining hosil bo'lishiga olib keladi. Yaxshiyamki, SiC ning hosil bo'lishi juda yuqori haroratni talab qiladi. Shuning uchun, bu asosan issiqlik qalqonida emas, balki isitgichlarning eng yuqori qismlarida sodir bo'ladi.

Kremniy monokristalining o'sishi paytida uglerod atomlarining diffuziyasi. Uglerodni o'z ichiga olgan birikmalar o'sayotgan monokristallga eritmadan kiradi. Muvozanatsiz kristallanish sharoitida qattiq va suyuq fazalardagi birikma miqdori o'rtasidagi nisbat uning samarali taqsimot koeffitsienti k bilan tavsiflanadi [3].

$$k = \frac{C_T}{C_J} = \frac{\gamma_J}{\gamma_T} \frac{N_T}{N_J}. \quad (1)$$

bu yerda C_T va C_J - mos ravishda monokristal va eritmadagi aralashmaning konsentratsiyasi; N_T va N_J - mos ravishda monokristal va eritmadagi aralashma atomlarining zichligi, atm / m³; γ_J va γ_T suyuq va kristalli kremniyning zichligi, mos ravishda, kg/m³ da.

Laboratoriya sharoitida (1) ifoda yordamida samarali taqsimot koeffitsientini to'g'ridan-to'g'ri eksperimental aniqlash mumkin. O'sish jarayonining har bir momentida uglerod atomlari uchun muvozanat tenglamasiga asoslanib, uglerod taqsimotining matematik modelini ishlab chiqilgan [5]

$$\frac{N_T(g)(1 - g)}{k(g)} - \frac{R^2}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} = \frac{V_p(g)}{V_R(g)} \frac{dV_p(g)}{V_R(g)} = \frac{N_T(0)}{k(0)} - \frac{1}{T} \frac{dN_T(g)}{dg} \quad (2)$$

Bu erda $k(0)$ eritma fraksiyasining o'sishining dastlabki bosqichida va kristallanish jarayonida samarali uglerod taqsimlanish koeffitsienti $k(g)$; $V_p(g)$ eritmaga uglerodning erish kamerasi bo'shlig'idan kirish tezligi R va r mos ravishda tigel va monokristal radiusi; $V_R(g)$ monokristalning o'sish tezligi. (2) tenglamaga kiritilgan miqdorlardan: $N_T(0)$, $V_p(g)$, R , r , γ parametrlar eksperimental ravishda aniqlanadi, γ_J va γ_T jadvalga kiritilgan miqdorlar [6]. Uglerod taqsimotining $V_p(g)$ bu ikki parametrining qiymatlarini topish uchun kristallangan eritmaning γ_i va γ_{i+1} fraksiyasining ketma-ket ikkita qiymatini (2) ga qo'yish orqali jadvalga kiritilgan va eksperimental ravishda aniqlangan miqdorlar tizimi tuziladi.

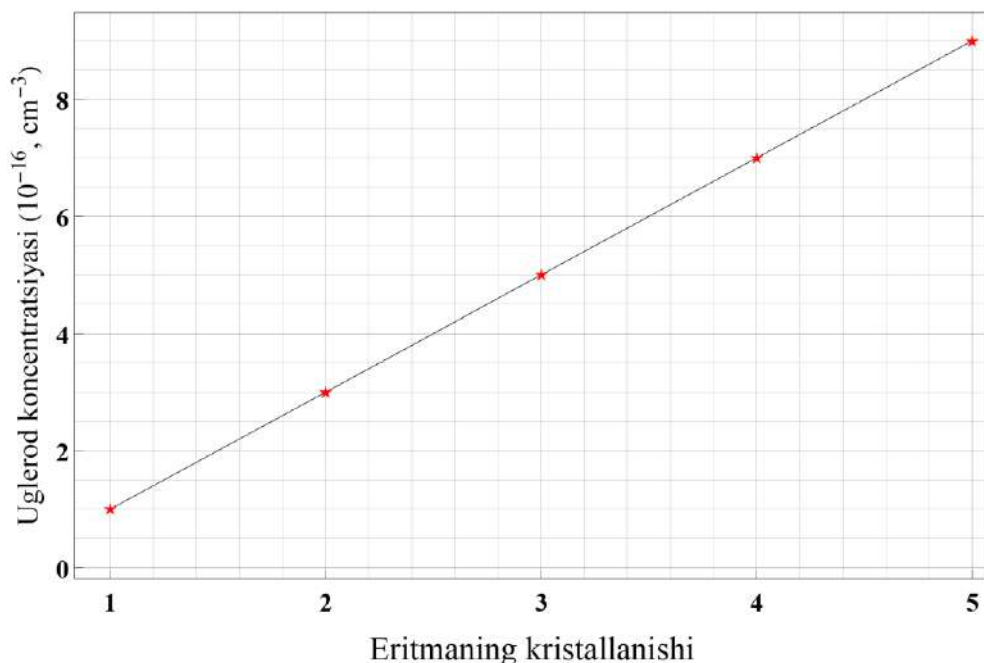
$$k_i = \frac{A_i B_{i+1} - A_{i+1} B_i}{C_i B_{i+1} - C_{i+1} B_i}, \quad (3)$$

bu yerda A_i , B_i , C_i kattaliklar g parametrga bog'liq bo'lgan doimiylardir.

(3) modelning asosiy afzalligi shundaki, uni qurishda samarali taqsimot koeffitsienti $k(g)$ va eritmaga uglerod oqimi tezligi $V_R(g)$ funksiyasidir, va u monokristal o'sishi paytida o'zgarib turadigan texnologik omillarning butun to'plamining bilvosita ko'rsatkichi hamdir. Ushbu model bizga standart kremniy monokristalda uglerod taqsimot koeffitsienti qiymatlarini aniqlash imkonini beradi.

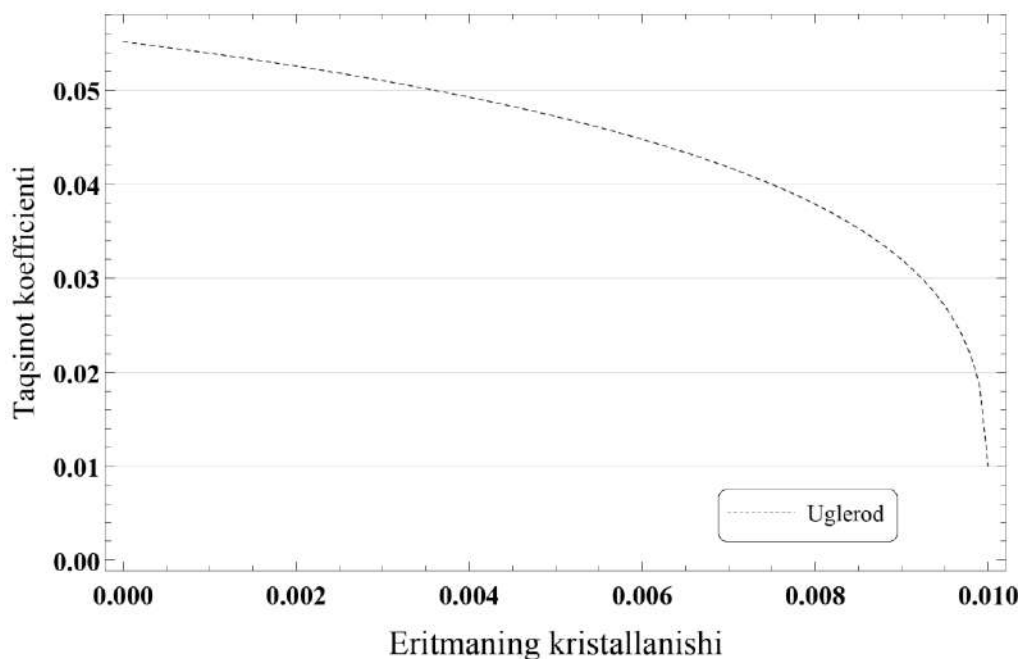
Natijalar va muhokama. Uglerod taqsimot koeffitsienti qiymatlarini aniqlash uchun biz (1)-(3) ifodalaridan foydalanamiz. Fosfor bilan qo'shilgan kremniy monokristallari (konsentratsiyasi $\sim 10^{15}$ k sm⁻³).

dislokatsiyasiz, kristallografik yo'nalishi $\langle 100 \rangle$ va diametri 100 mm bo'lgan sharoitda Czochralski usuli bilan o'stirildi. Yetishtirilgan kremniy monokristallaridagi uglerod konsentratsiyasi Bruker VEKTOR 22 infraqizil spektrofotometri yordamida standart infraqizil yutilish usuli bilan o'lchandi [6]. Monokristalda uglerod konsentratsiyasini o'lchashning qisqacha natijalari 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. Kremniy monokristallarining o'sishi jarayonida uglerod konsentratsiyasining o'zgarishi

Monokristaldagi uglerod konsentratsiyasining ortishi, o'stirish moslamasining ishchi kamerasining termal blokining grafit qismlaridan gaz fazasi orqali kirishi natijasida eritmadagi konsentratsiyasining ortishi bilan bog'liq. Monokristallardagi uglerod konsentratsiyasining kristallangan eritmaning ulushiga eksperimental bog'liqligiga asoslanib (1-rasmga qarang), kristallanishning turli bosqichlarida uglerodning samarali taqsimot koeffitsientining qiymati (1) model yordamida hisoblab chiqildi (2-rasmga qarang). Eritmaning taxminan yarmi kristallangandan so'ng samarali taqsimot koeffitsientining qiymati kamayish jarayoni 2 rasmda ko'rsatilgan.



2-rasm. Eritmadan kristallanish jarayonida kremniydagi uglerodning samarali taqsimlanish koeffitsientining o'zgarishi

4. Kremniy monokristallarida kislorod kompleks hosil bo'lish jarayonlariga uglerod atomlarining ta'sirini tahlil qilish

O'sish jarayonida kremniy monokristalida ichki nuqtaiy defektlar — bo'shliqlar va interstitsial kremniy atomlari — hosil bo'ladi. Ikkala turdagi defektlarning muvozanat konsentratsiyasi harorat pasayishi bilan eksponentsial ravishda kamayadi. Shunday qilib, kremniy monokristalli ichki va tashqi (aralashma atomlari) nuqtaviy defektlarining qattiq eritmasidir. Monokristall soviganida, bo'shliqlar va interstitsial kremniy atomlari qattiq eritmada cho'kadi va aralashmalar bilan o'zaro ta'sir qilib, turli xil komplekslar va mikro defektlarni hosil qiladi.

Kremniydagi uglerod birikmasining samarali taqsimlanish ko'effitsientidagi kuzatilgan o'zgarishni quyidagicha izohlash mumkin. Fosfor qo'shimchasining taqsimlanish ko'effitsientlari ($k = 0.35$) va boshqa aralashmalar ($k \sim 10^{-6} \dots 10^{-1}$) birlikdan kam; ularning atomlarining aksariyati kristallanish jarayonida kristallanish frontidan eritmaga qaytadi. Natijada, bu aralashmalarining konsentratsiyasi ham eritmada, ham monokristal o'sishi paytida ortadi. Kislorodning tarqalish ko'effitsienti ham birlikdan kam ($k = 0.5$); ammo, eritmada kvartsning erishi va uning kristallanish frontida qayta taqsimlanishi tufayli monokristaldagi konsentratsiyasining oshishi eritma yuzasidan kremniy oksidi SiO_2 shaklida kislorodning bug'lanishi bilan sezilarli darajada qoplanadi. Natijada, kislorod kremniydagi yagona aralashma bo'lib, uning konsentratsiyasi monokristal o'sishi paytida kamayadi. Turli aralashmalar uchun k qiymatlarining o'zgaruvchanligi tufayli ularning konsentratsiyalari nisbati asta-sekin o'zgaradi, ayniqsa o'sish jarayonining oxiriga yaqinlashganda sezilarli darajada o'zgaradi. Turli tadqiqotchilar kremniyni termik ishlov berish jarayonida uglerod konsentratsiyasi kislorod cho'ktirish jarayonlariga, termal donorlarning [2] va termal akseptorlarning shakllanishiga va elektr faol aralashmalarga ega komplekslarning shakllanishiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkinligini ko'rsatdilar [3]. Uglerod ishtirokidagi komplekslarning shakllanishi qarshilikning termal barqarorligiga va muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning ishlash muddatiga salbiy ta'sir qiladi [4].

Defektlar konsentratsiyasi oshgani sayin, ularning eritmada o'zaro ta'siri kuchayadi, bu esa kristallanish jarayonida bu aralashmalaning kremniyning suyuq fazadan kristall olatiga o'tishiga, uning samarali taqsimlanish ko'effitsientlarining kattaligiga ta'sir qilishi mumkin. Xususan, kislorod va uglerod aralashmasining konsentratsiya nisbatining samarali taqsimlanish ko'effitsientiga ta'sir qilishi tajribada aniqlangan [7,8].

Kremniyda kislorod komplekslarining hosil bo'lish jarayonida uglerod atomlarining ishtirok etishi mumkin [9]. Optik faol uglerod atomlarini, ya'ni kremniy kristall panjarasining tugunlarida joylashgan uglerod atomlarini aniqlash uchun standart infraqizil yutilish usuli qo'llaniladi. Uglerod $N_C = 0.95 \times 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyasining infraqizil yutilish usulida o'lchangan qiymati monokristalning oxirgi qismida uning atomlarining haqiqiy konsentratsiyasidan pastroq bo'lib chiqdi, bu esa ushbu monokristalning uzunligi bo'ylab uglerod konsentratsiyasining anomal taqsimotini tushuntiradi. Ushbu eksperimental fakti 2-rasmdagi ma'lumotlar bilan taqqoslab, kremniy monokristalidagi aralashmalar konsentratsiyasi nisbatining o'zgarishi kristallanish paytida uning kristall panjarasidagi komplekslanishga sezilarli ta'sir ko'rsatadi degan xulosaga kelish mumkin.

Xulosa. Ushbu ishda dislokatsiyasiz kremniy monokristallarini o'stirish jarayonida, aralashmalar konsentratsiyasi nisbatining o'zgarishi tufayli, uglerod atomlarining aralashmalar komplekslarini hosil qilishda ishtiroki faollashishi aniqlandi.

ADABIYOTLAR:

1. Stubhaug, E., Ecker, R., 2005. *Haroratga bog'liq va in'ektsiyaga bog'liq umrbod spektroskopiya, Norvegiya Fan va Texnologiya Universiteti, Fan va Texnologiya Fakulteti, Fizika kafedrasi, Trondxaym, Norvegiya.*
2. Khanna, V., 2005. *Yarimo'tkazgich materiallari va qurilmalarida zaryad tashuvchilarining umrini fizik tushunish va texnologik boshqarish: kontseptual ishlab chiqish, san'at holati va qo'llanilish bo'yicha tanqid, Qattiq jismli qurilmalar bo'limi, Markaziy elektronika tadqiqot instituti, Rajastan, Hindiston.*
3. Begbroke, B. Wang, 2011. *Yarimo'tkazgichli qurilmalarning ishlash tamoyillari* (<http://ecee.colorado.edu/~bart/book/contents.htm> saytida onlayn mavjud, 2013-yil sentyabr oyida kirish mumkin).
4. Li Sheng S., 2006. *Yarimo'tkazgichlarning fizik elektronikasi. Elektrotexnika va kompyuter muhandisligi kafedrasi, 2-nashr, Florida universiteti, AQSh.*

5. McDonald, D., 2001. Polikristalli kremniyli quyosh batareyalarida rekombinatsiya va tutqunlik, PhD dissertatsiyasi, Avstraliya Milliy Universiteti.
6. Angelskara, H., Söndena, R., Wiig, M.S., Marstein, E.S., 2012. Czochralski tomonidan qayta ishlangan kremniyda oksidlanish yoriq halqalarining tavsifi: Rayt o'yib ishlanganidan keyin fotolyuminestsentsiya tasvirlash va vizual tekshirish, *Energiya. Prosedura* 27, 160-166.
7. CZ kremniyidagi defektlarning tavsifi Quyosh xujayralari uchun n -tip, PhD dissertatsiyasi, NTNU.
8. Haunschild, J., Reis, I.E., Geilker, J., Rein, S., 2011. Fotolyuminestsentsiya tasvirlash yordamida quyosh batareyalarini ishlab chiqarish uchun Czochralski tomonidan yetishtirilgan kremniy plitalarida samaradorlikni cheklovchi defektlarni aniqlash, *Fizika holati. Solidi RRL* 5, 199-201.
9. Porrini, M., Voronkov, V., Falster, R., 2006. Czochralski usuli bilan olingan kremniy kristallarida hosil bo'lgan mikrodefektlarga uglerod va surmaning ta'siri, *Materialshunoslik va muhandislik: B*, 134, 185-188.

NAVOIY VILOYATI HUDUDIDAGI SUVLARNING RADIOAKTIVLIGINI ANIQLASH VA BAHOLASH

Sunnatova Sevinch Husan qizi,

NavDU Fizika va astronomiya ta'lim yo'nalishi talabasi

Ibrohimov Vohidjon Umidjon o'g'li

NavDU Fizika va astronomiya ta'lim yo'nalishi talabasi,

Soliyev Tursunboy Izzatillo o'g'li

NavDU "Fizika va astronomiya" kafedrasi dotsenti, t.f.f.d. (PhD)

tursunboy.soliyev@bk.ru

Annotatsiya. Uran yemirilish zanjiri radionuklidlari barcha tabiat namunalarida tarqalgan bo'lib hiosblanadi. Tabiat namunalarida (tuproq, suv, havo, o'simlik) joylashgan o'rni va hududiga hamda tadqiqot olib borilayotgan hududning xususiyatiga ko'ra turlicha bo'ladi. Quyida tabiat namunalari tarkibidagi uran yemirilish zanjiri radionuklidlarini gamma-spektrometrik usulda aniqlashning yadro-fizik jihatlarini keltirib o'tilgan. Mazkur maqolada Navoiy viloyati hududidagi yer osti va yer usti suvlarida tabiiy radionuklidlar, xususan uran izotoplari (U-234 va U-238) ning miqdori va taqsimlanishi o'rganildi. Tadqiqot davomida suv namunalarida radiometrik va mass-spektrometrik usullar yordamida radionuklidlar faolligi aniqlanib, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ izotop nisbatlari hisoblandi. Olingan natijalar suv muhitida radionuklidlarning migratsiyasi va geokimyoviy xatti-harakatlarini baholash imkonini berdi.

Kalit so'zlar: radionuklidlar, ^{234}U , ^{238}U , gamma-spektrometriya, ICP-MS, suv radioaktivligi, Navoiy viloyati, gamma-spektrometrik tahlil.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОЦЕНКА РАДИОАКТИВНОСТИ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ НАВОЙСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Считается, что радионуклиды, образующиеся в результате распада урана, присутствуют во всех природных образцах. Их содержание варьируется в зависимости от местоположения и области исследования природных образцов (почва, вода, воздух, растения), а также от характера изучаемой территории. Ниже представлены ядерно-физические аспекты гамма-спектрометрического определения радионуклидов, образующихся в результате распада урана, в природных образцах. В данной статье изучается количество и распределение природных радионуклидов, в частности изотопов урана (U-234 и U-238), в грунтовых и поверхностных водах Навоийской области. В ходе исследования определялась активность радионуклидов в образцах воды с использованием радиометрических и масс-спектрометрических методов, а также рассчитывались изотопные отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Полученные результаты позволили оценить миграцию и геохимическое поведение радионуклидов в водной среде.

Ключевые слова: радионуклиды, ^{234}U , ^{238}U , гамма-спектрометрия, ICP-MS, радиоактивность воды, Навоийский регион, гамма-спектрометрический анализ.

DETERMINATION AND ASSESSMENT OF THE RADIOACTIVITY OF WATERS IN THE NAVOI REGION

Abstract. Uranium decay chain radionuclides are considered to be distributed in all natural samples. They vary depending on the location and area of the location in natural samples (soil, water, air, plants) and the nature of the area being studied. The nuclear-physical aspects of the gamma-spectrometric determination of uranium decay chain radionuclides in natural samples are presented below. This article studies the amount and distribution of natural radionuclides, in particular uranium isotopes (U-234 and U-238), in groundwater and surface waters in the Navoi region. During the study, the activity of radionuclides was determined in water samples using radiometric and mass spectrometric methods, and the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotope ratios were calculated. The results obtained allowed us to assess the migration and geochemical behavior of radionuclides in the aquatic environment.

Keywords: radionuclides, ^{234}U , ^{238}U , gamma-spectrometry, ICP-MS, water radioactivity, Navoi region, gamma-spectrometric analysis.

Kirish. Atrof-muhitdagi radioaktivlikni o'rganish ekologik xavfsizlikni ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi. Ayniqsa, uran konlariga boy hududlarda yer osti va yer usti suvlarida tabiiy radionuklidlarning mavjudligi hamda ularning migratsiyasi inson salomatligi va ekologik tizimlarga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli suv resurslarining radiatsion holatini muntazam monitoring qilish zamonaviy radioekologiyaning dolzarb yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Navoiy viloyati Markaziy Osiyodagi yirik uran qazib olish hududlaridan biri bo'lib, ushbu hududda tabiiy radioaktiv elementlarning suv havzalariga o'tish jarayonlarini o'rganish muhim ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Uran qazib olish va qayta ishlash bilan bog'liq geokimyoviy jarayonlar yer osti suvlarida radionuklidlar miqdorining ortishiga sabab bo'lishi mumkin [1-3].

Yer yuzida tarqalgan uran tarkibli minerallarda asosan uch xil izotop - ^{234}U , ^{235}U va ^{238}U uchraydi. Tabiatda uchta asosiy tabiiy radioaktiv oila mavjud bo'lib, ularning boshlang'ich radionuklidlari ^{238}U , ^{232}Th va ^{235}U hisoblanadi. Ushbu radionuklidlarning yemirilishi natijasida ^{234}Th , ^{234}Pa , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Po , ^{218}Po va ^{210}Pb kabi ko'plab radioaktiv izotoplar hosil bo'ladi. Mazkur radionuklidlar alfa, beta va gamma nurlanish manbalari bo'lib, ular atrof-muhit komponentlarida uzoq muddat saqlanish xususiyatiga ega. Oila boshliqlarining yarim yemirilish davrlari juda katta bo'lib, $7,2 \cdot 10^8$ yildan $1,4 \cdot 10^{10}$ yilgacha davom etadi. Yemirilish mahsulotlarining yarim yemirilish davrlari esa juda keng diapazonda o'zgaradi: masalan, ^{212}Po uchun 0,3 mikrosekund bo'lsa, ^{234}U uchun $2,5 \cdot 10^5$ yilni tashkil etadi. Tabiiy radioaktiv yemirilish zanjirlari yakunda qo'rg'oshinning turg'un izotoplari - ^{206}Pb , ^{207}Pb va ^{208}Pb hosil bo'lishi bilan tugaydi [4-5].

Ushbu izotoplar ichida ^{234}U radionuklidi suvda yaxshi eruvchanligi bilan ajralib turadi. Shu sababli yer osti suvlarida $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ izotop nisbatini o'rganish radioaktiv muvozanat holatini baholashda muhim ko'rsatkich hisoblanadi. Uran-238 tabiiy uranning asosiy qismini tashkil etadi, ^{234}U esa uning yemirilish mahsuloti sifatida hosil bo'ladi. Geokimyoviy va gidrologik jarayonlar ta'sirida ushbu izotoplarning suvdagi konsentratsiyasi o'zgarib boradi. Ayniqsa, jinslarning yemirilishi, suvning minerallanish darajasi, oksidlanish-qaytarilish jarayonlari va radionuklidlarning sorbsiya xususiyatlari izotoplar nisbatiga ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ nisbatining o'zgarishi radionuklidlarning migratsiya jarayonlarini aniqlashda muhim indikator sifatida qo'llaniladi [6-8].

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi Navoiy viloyati hududidagi suv namunalarida uran izotoplarining faolligini aniqlash hamda ularning izotop nisbatlari asosida hududning radiatsion holatini baholashdan iborat. Tadqiqot natijalari suv resurslarining radioekologik holatini tahlil qilish, radionuklidlarning tabiiy migratsiya qonuniyatlarini aniqlash va ekologik xavfsizlikni ta'minlash bo'yicha ilmiy asoslangan tavsiyalar ishlab chiqishda muhim manba bo'lib xizmat qiladi.

Metodika.

1. Namunani tanlash va tayyorlash. Biz tadqiqot obyekti sifatida yurtimizning eng katta sanoat zonalaridan biri hisoblanadigan Navoiy viloyatini tanladik. Chunki, bu hududda uran sanoati juda rivojlangan. Shu sababli ham hududdagi artesian quduqlari, ochiq suv manbalari, kanal, daryo kabilardan suv namunalari olib tekshirib ko'riladi. Har bir nuqtadan 1–2 litr hajmda namuna olindi.

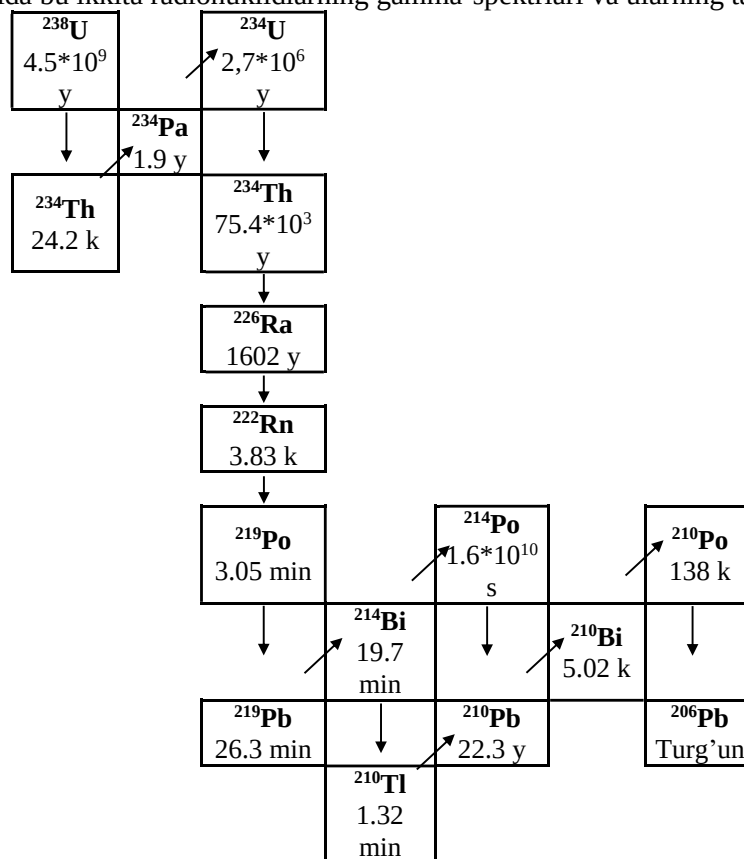
Olingan namunalar laboratoriyaga keltirib filtdan o'tkaziladi. Chunki, tajriba o'tkazilayotgan suv namunasi tarkibida ortiqcha ingredientlar bo'lmasligi talab etiladi. Shu sababli kichik o'lchamdagi - 0,45 mkm li filtrlardan foydalanamiz. Har xil keraksiz jinslardan tozalangan suv tarkibini o'rganish maqsadida HNO_3 bilan aralashtiriladi. Yana bir muhim jihatdan biri kislotali $\text{pH} < 2$ bo'lishi talab etiladi. Izotoplar orasidagi muvozanatni saqlash va tajribada o'rganish maqsadida tashqi muhitdan izolyatsiyalangan germetik idishda saqlanadi.

2. Tahlil usullari. Ushbu tadqiqot ishida quyidagi usullar qo'llanildi:

Namunalar tarkibidagi ^{238}U aniqlash maqsadida gamma-spektrometrdan foydalanamiz. U-238 radionuklidi alfa - yemirilishga uchraganligi sababli yemirilish zanjiridagi 2 ta gamma - liniyadan foydalandik. U-238 yemirilish zanjirida 352 keV gamma-liniyali ^{214}Pb va 609 keV gamma-liniyali ^{214}Bi radionuklidlari mavjudligi hisobiga tekshirilayotgan namunalar tarkibida uran izotoplari mavjud ekanligi to'g'risidagi xulosaga olib keladi. Albatta ushbu tajribalarni o'tkazish uchun biz ssintillyatsion gamma-spektrometrik usuldan foydalanamiz. Namunalar tarkibidagi izotoplarining miqdorini bevosita aniqlash uchun esa ICP-MS dan foydalanib mass-spektrometrik usul yordamida U-234 va U-238 radionuklidlarining miqdorini aniqlab olamiz.

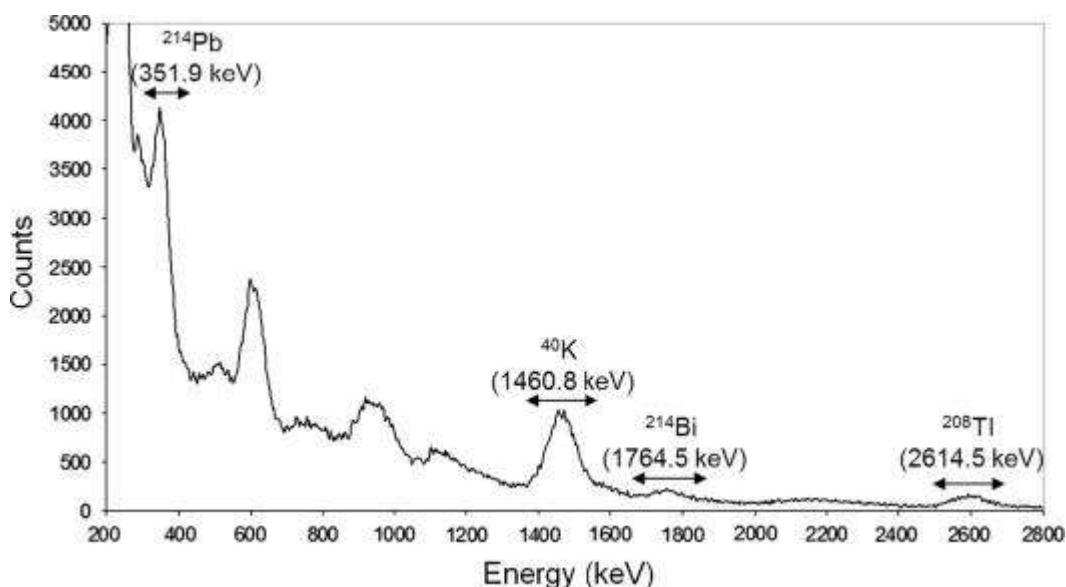
Uran yemirilish zanjiri 8 ta alfa va 6 ta beta - yemirilishdan iborat bo'ladi. Ushbu yemirilish zanjirida uzoq va qisqa yashovchi radionuklidlardan iborat bo'ladi. Namunalar tarkibida uran mavjudligini aniqlashda bir necha xil radionuklidlarni aniqlash talab etiladi. Masalan, gamma-spektrometrdan Bi-214, Pb-214

radionuklidlarini aniqlash orqali biz namunalar tarkibida uran mahsulotlari mavjud degan xulosaga kelishimiz mumkin. Quyida bu ikkita radionuklidlarning gamma-spektrlari va ularning tahlili keltirilgan.



1-rasm. Uran yemirilish zanjiri sxematik ko‘rinishi

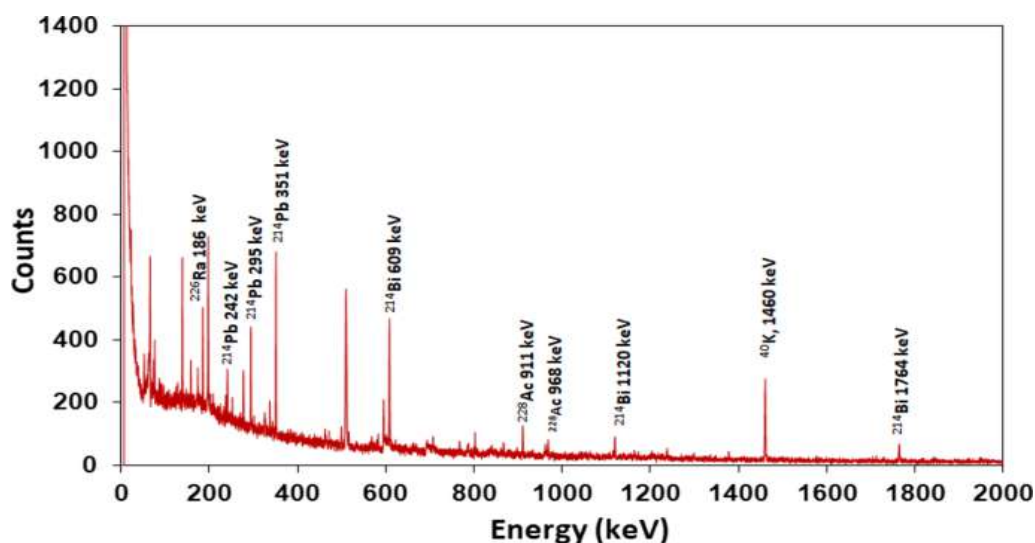
Tekshirilayotgan namuna tarkibidagi uran yemirilish zanjiri radionuklidlarini gamma-spektrometrik tahlil usuli yordamida aniqlash maqsadida, biz Pb-214 radionuklidining 352 keV energiyali gamma-nurlanishidan foydalanamiz.



2-rasm. Uran yemirilish zanjiridagi ^{214}Pb radionuklidining 352 keV gamma-liniyasining gamma-spektrometrda olingan spektri ko‘rinishi.

Ushbu spektrda tuproq namunalari tarkibidagi yana bir qancha radionuklidlar mavjud ekanligini ko'rishimiz mumkin. Masalan, 1460,8 keV energiyali K-40 radionuklidi, 351,9 keV energiyali Pb-214 va 2614,5 keV energiyali Tl-208 radionuklidlari mavjudligi aniqlandi.

Tekshirilayotgan namuna tarkibidagi uran yemirilish zanjiri radionuklidlarini gamma-spektrometrik tahlil usuli yordamida aniqlash maqsadida, Biz Bi-214 radionuklidining 609 keV energiyali gamma-nurlanishidan foydalanamiz.



3-rasm. Uran yemirilish zanjiridagi ^{214}Bi radionuklidining 609 keV gamma-liniyasining gamma-spektrometrda olingan spektr ko'rinishi.

Tekshirilayotgan namuna tarkibidagi spektrga ko'ra namuna tarkibidagi bir qancha radionuklidlar qarab chiqilgan. Masalan, 1120 keV energiyali Bi-214 radionuklidi, 1460 keV energiyali K-40 radionuklidi, 351 keV energiyali Pb-214 radionuklidi, 186 keV energiyali Ra-226 radionuklidlarini ham ko'rishimiz mumkin.

Bundan kelib chiqadiki, namunalar tarkibidagi U-234 va U-238 radionuklidlarini aniqlash uchun biz faqatgina alfa-spektrometrdan foydalanish bilan bir qatorda ssintillyatsion gamma-spektrometrik tahlil usulidan foydalanish ham ancha samarali metod hisoblanishini ko'rsatib beradi. Shu sababli ham, namuna tarkibidagi alfa -yemirilishga uchragan radionuklidlarni uyg'ongan holatdan asosiy holatga o'tishdagi gamma – nurlanishiga ko'ra, aniqlash metodidan foydalanish o'zining samarasini berishini ko'rsatib bermoqda.

3. Hisoblash. Tekshirilayotgan namuna tarkibidagi radionuklidlar orasidagi radioaktiv muvozanatni baholash maqsadida asosan uran yemirilish zanjiridagi ona yadro va qiz yadro radionuklidlarining aktivliklari nisbatidan foydalanish orqali kerakli natijalarga erishamiz:

$$k_{rm} = \frac{A(\text{qiz yadro})}{A(\text{ona yadro})}$$

Bu yerda, A (qiz yadro) - radionuklidning yemirilishdan keyingi mahsulot aktivligi, A (ona yadro) – radionuklidning yemirilish boshlanishidagi aktivligi.

Tahlil qilinayotgan suv namunalari tarkibidagi radioaktiv muvozanatni baholash maqsadida biz namuna tarkibidagi U^{234} radionuklidining solishtirma aktivligini va namuna tarkibidagi U^{238} radionuklidining solishtirma aktivliklari nisbatidan foydalanamiz.

Izotop nisbati quyidagi formula orqali aniqlandi:

$$k = \frac{A(\text{U} - 234)}{A(\text{U} - 238)}$$

Natijalar.

1. Eksperimental ma'lumotlar asosida

Namuna	U-238 (Bq/l)	U-234 (Bq/l)	U-234/U-238
S1	0.45	0.50	1.11
S2	0.62	0.70	1.13
S3	0.38	0.35	0.92
S4	0.80	0.92	1.15

S5	0.55	0.60	1.09
----	------	------	------

Olingan natijalar tahlilidan ko‘rinib turibdiki, U-234 radionuklidi namunada U-238 radionuklidlar solishtirma aktivligi yuqori hisoblanadi. Jadvalning oxirgi ustunida radionuklidlarning izotop nisbati 0,9 – 1,15 oralig‘ida qiymatlar aniqlandi.

U-234/U-238 ≈ 1 bo‘lishi radioaktiv muvozanatga yaqin holatni bildiradi.

U-234/U-238 > 1 bo‘lsa - yuvilish (leaching) jarayoni ustun.

U-234/U-238 < 1 bo‘lsa - akkumulyatsiya kuzatiladi.

Bu natijalar siz ishlayotgan uran yemirilish zanjiri va radioaktiv muvozanat masalalari bilan to‘liq mos keladi.

Muhokama. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, suv muhitida U-234/U-238 nisbatining 1 dan katta bo‘lishi uran izotoplarining selektiv migratsiyasini bildiradi. Bu holat quyidagi fizik jarayonlar bilan izohlanadi:

- alpha-recoil effekti – U-234 kristall panjaradan chiqib ketadi;
- eritilish jarayoni – U-234 suvda tezroq eriydi;
- geokimyoviy harakatchanlik – U-234 mobilroq.

Xulosa. Navoiy viloyati suvlarida o‘tkazilgan tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki:

- suv muhitida U-234 va U-238 izotoplari mavjud;
- izotop nisbatlari 0.9–1.15 oralig‘ida o‘zgaradi;
- bu holat radionuklidlarning geokimyoviy migratsiyasi bilan bog‘liq.

Olingan natijalar Chalov va Cherdynstev effektlari bilan yaxshi mos keladi. Xususan, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ nisbatining 1 dan katta bo‘lishi α -recoil jarayoni natijasida U-234 izotopining kristall panjaradan chiqib ketishi va suv muhitida yuqori migratsiyaga ega ekanligini ko‘rsatadi. Ushbu holat Cherdynstev effekti bilan izohlanadi. Shu bilan birga, ^{234}U ning suv muhitida yuqori harakatchanligi Chalov effekti asosida tushuntiriladi. Natijada suv namunalarida ^{234}U ning nisbiy boyishi kuzatiladi. Ayrim namunalar uchun nisbatning 1 dan kichik bo‘lishi esa adsorbsiyada cho‘kish jarayonlari ustunligini bildiradi.

Ushbu tadqiqot natijalari hududda radiatsion monitoringni kuchaytirish zarurligini ko‘rsatadi va ekologik xavfsizlikni ta‘minlashda muhim ahamiyatga ega.

ADABIYOTLAR:

1. IAEA, *Measurement of Radionuclides in Food and Environment, Technical reports, series №295. International atomic energy agency, Vienna, 1989. pp.169.*
2. Рассказов С. В., Ильясова А. М., Чебыкин Е. П., Гутарева О. С., Снопков С. В. Современное вовлечение в деформации края сибирского палеоконтинента в байкальской рифтовой системе: данные U-H-O-изотопной систематики подземных вод // Геология и окружающая среда. 2025. ТОМ 5, № 1.
3. D.N. Edgington, J.A. Robbins, S.M. Colman, K.A. Orlandini, M.-P. Gustin. Uranium-series disequilibrium, sedimentation, diatom frustules, and paleoclimate change in Lake Baikal, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 142, Issues 1–2, 1996, Pages 29-42, ISSN 0012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00085-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00085-4).
4. Minoru Koide, Edward D. Goldberg, Uranium-234/uranium-238 ratios in sea water, *Progress in Oceanography*, Volume 3, 1965, Pages 173-177, ISSN 0079-6611, [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(65\)90016-9](https://doi.org/10.1016/0079-6611(65)90016-9).
5. Soliyev, T.I., Muzafarov, A.M., & Izbosarov, B.F. (2021). Experimental determination of the radioactive equilibrium coefficient between radionuclides of the uranium decay chain. *Theoretical & Applied Science" International scientific journal*, 801-804.
6. Soliyev, T.I., & Muzafarov, A.M. (2021). Investigation of the causes of violations of the radioactive balance between radionuclides of the uranium decay chain. *International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding*, 8(7), 95-101.
7. Quvvatov, Q.D., Soliyev, T.I., Muzafarov, A.M., & Allaberganova, G.M. (2024). Yer osti suvlarida $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ radionuklidlari orasidagi radioaktiv muvozanat buzulishlari tadqiqoti. *Science and innovation*, 3(Special Issue 23), 211-214.
8. Allaberganova, G.M., Turobjonov, S.M., Kgolov, D.M., Soliev, T.I., Muzafarov, A.M., & Kurbanov, B.I. (2019, September). Methods of assessment of radiation factors of uranium production and their anthropogenic impact on the ecosystem. In *Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies: the Ninth International conference* (pp. 24-27).

ДВУМЕРНАЯ СВЯЗАННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ В НАПРЯЖЕНИЯХ ДЛЯ ИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ

Каландаров Азиз Абдукаюмович,
доцент Гулистанского государственного
педагогического института, PhD
abrorshox@mail.ru

Каландаров Абдукаюм,
старший преподаватель Гулистанского
государственного университета
q_abduqayum@mail.ru

Аннотация. В статье предложена динамическая модель связанной задачи термоупругости в напряжениях. Сформулирована связанная краевая задача, состоящая из трех дифференциальных уравнений относительно компонент тензора напряжений и температуры, а также уравнения притока тепла с соответствующими начальными и граничными условиями. Разработаны явные и неявные конечно-разностные уравнения решаемые последовательным применением метода прогонки по координатным осям, и рекуррентных соотношений, соответственно. Численно решена плоская связанная динамическая задача термоупругости в напряжениях. Сравнением результатов явных и неявных показана достоверность результатов и справедливость предложенной связанной краевой задачи термоупругости в напряжениях.

Ключевые слова: Termoelastiklik, kuchlanish, deformatsiya, aniq sxema, yashirin sxema, konvergensiya.

IZOTROP JISMLAR UCHUN KUCHLANISHLARGA NISBATAN IKKI O'LCHOVLI BOG'LIQ DINAMIK TERMOELASTIK MASALA

Annotatsiya. Ushbu maqolada kuchlanish ostida termoelastiklikning bog'liq masalasining dinamik modeli taklif qilingan. Bog'liq chegarviy masala shakllantirilgan bo'lib, u kuchlanishlar tenzori va temperatura komponentlari uchun uchta differensial tenglamalar va issiqlik oqimi tenglamasidan, shuningdek, mos keladigan boshlang'ich va chegaraviy shartlardan iborat. Koordinata o'qlari va takrorlanish munosabatlari bo'ylab supurish usulini ketma-ket qo'llash orqali yechilgan aniq va yashirin chekli farq tenglamalari ishlab chiqilgan. Kuchlanish ostida termoelastiklikning tekis bog'langan dinamik muammosi sonli ravishda yechilgan. Aniq va yashirin natijalarni taqqoslash natijalarning ishonchligini va kuchlanish ostida termoelastiklikning taklif qilingan bog'langan chegara qiymati muammosining haqiqiyiligi ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: nochiziqli termoelastiklik, bog'liq masala, issiqlik o'tkazuvchanlik, ayirmali tenglamalar, oshkor sxema, oshkormas sxema, iteratsiya, o'zgaruvchan yo'nalishlar usuli.

TWO-DIMENSIONAL COUPLED DYNAMIC PROBLEM OF THERMOELASTICITY IN STRESSES FOR ISOTROPIC BODIES

Abstract. This paper proposes a dynamic model of the coupled problem of thermoelasticity in stresses. A coupled boundary value problem consisting of three differential equations for the stress tensor components and temperature, as well as the heat influx equation with the corresponding initial and boundary conditions is formulated. Explicit and implicit finite-difference equations have been developed that can be solved by sequential application of the elimination method and recurrence relations, respectively. The coupled dynamic problem of plane thermoelasticity in stresses is solved numerically. Numerical results show the reliability of the results and the validity of the proposed coupled boundary value problem of thermoelasticity in stresses.

Key words: Thermoelasticity, stresses, deformations, explicit scheme, implicit scheme, convergence.

Введение. Математическое и численное моделирование процесса деформирования с учетом взаимовлияния термических и механических факторов является актуальной проблемой термоупругости и математического моделирования. В механике, обычно при решении термоупругих задач температурное поле считается известным как решение уравнения теплопроводности. Но, для того чтобы более адекватнее описать процесс деформирования с учетом температуры, наряду с уравнениями движения необходимо рассмотреть уравнение притока тепла. Тогда краевая задача становится связанной относительно перемещений и температуры. При статическом случае, задача становится несвязанной, и механические и тепловые уравнения могут решены независимо друг от друга [1].

В общем случае, связанная динамическая краевая задача термоупругости состоит из уравнения движения, соотношения между напряжениями и деформациями с учетом температуры, соотношения Коши, и уравнения притока тепла с соответствующими начальными и краевыми условиями. Все выше изложенные задачи термоупругости и термопластичности обычно решаются в перемещениях [2].

В последнее время формулировка связанных задач термоупругости относительно напряжений и температуры, и их численное решение становится актуальной. Обычно, краевые задачи в напряжениях рассматриваются в рамках уравнений Бельтрами-Мичелла. В этом направлении можно отметить работы Коновалова [3], [4] и др.

В работах [5-7] рассматриваются различные математические модели теории упругости и термоупругости, а также методы их решения.

Данная работа посвящена формулировке связанной задачи динамической термоупругости без использования уравнений Бельтрами-Мичелла. Рассмотрена плоская задача о свободной пластине находящейся в начальный момент времени в температурном поле куполообразной формы. Составлены разностные схемы явной формы и решение которых сведены к рекуррентным соотношениям.

постановка задачи. Обычно, связанная задача плоской термоупругости состоит из уравнения движения

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial y} + X_1 = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial y} + X_2 = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2)$$

соотношения Дюамеля-Неймана

$$\sigma_{11} = (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{11} + \lambda \varepsilon_{22} - \gamma(T - T_0) \quad (3)$$

$$\sigma_{22} = (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{22} + \lambda \varepsilon_{11} - \gamma(T - T_0) \quad (4)$$

$$\sigma_{12} = 2\mu \varepsilon_{12}, \quad (5)$$

соотношения Коши

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (8)$$

и, уравнение притока тепла [1]

$$\lambda_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - c_\varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} - (3\lambda + 2\mu) \alpha T \left(\frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial t} \right) = 0 \quad (9)$$

где, σ_{ij} – тензор напряжений, ε_{ij} – тензор деформаций, u_i – перемещения, λ, μ – постоянные Ляме, X_i – объёмные силы, c_ε – теплоёмкость при постоянной деформации, ρ – плотность тела, $\gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha$, α – коэффициент теплового расширения, λ_0 – коэффициент теплопроводности, с известными начальными и граничными условиями относительно перемещений и температуры.

Для того, чтобы записать задачу (1-9) относительно напряжений и температуры, продифференцировав (1) по x и (2) по y получим

$$\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} + X_1 = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} + X_2 = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (11)$$

С учетом соотношений Коши (6-7) уравнения (10-11) принимают вид

$$\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} + X_1 = \rho \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} + X_2 = \rho \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial t^2} \quad (11)$$

или

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} + X_1 \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} + X_2 \right) \quad (13)$$

Далее дважды продифференцируем уравнения (3) и (4) по времени t

$$\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial t^2} + \lambda \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial t^2} - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial t^2} + \lambda \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial t^2} - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}. \quad (15)$$

Подставляя (12) и (13) в (14) и (15) соответственно, при отсутствии объемных сил, получим

$$\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} \right) - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} \right) + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} \right) - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (17)$$

или

$$\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} + \frac{2(\lambda + \mu)}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x \partial y} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}. \quad (19)$$

Далее продифференцируя (1) по y и (2) по x , без учета объемных сил можно найти т.е.

$$\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial x \partial y} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (21)$$

Сложив (20) и (21) получим

$$\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial x \partial y} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (22)$$

разделяя (22) на 2 имеем

$$\frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial x \partial y} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (23)$$

Подставляя (8) в (23) получим

$$\frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial x \partial y} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial t^2}. \quad (23)$$

Теперь продифференцируем соотношение (5) дважды по времени t

$$\frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial t^2} = 2\mu \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial t^2}. \quad (24)$$

и, подставляя (23) в (24) будем иметь

$$\frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial x \partial y} \right). \quad (25)$$

Таким образом, мы получили систему трех уравнений (18,19) и (25) относительно компонент тензора напряжений и температуры. Теперь осталось присоединить к этой системе, уравнение притока тепла выраженное относительно температуры и напряжения.

Для чего, соотношение Дюамеля-Неймана записываем в разрешенном относительно напряжений форме [1]

$$\varepsilon_{ij} = \alpha(T - T_0) \delta_{ij} + \frac{1}{2\mu} \left(\sigma_{ij} - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (26)$$

и, оно в двумерном случае имеет вид

$$\varepsilon_{11} = \alpha(T - T_0) + \frac{1}{2\mu} \left(\sigma_{11} - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right) \quad (27)$$

$$\varepsilon_{22} = \alpha(T - T_0) + \frac{1}{2\mu} \left(\sigma_{22} - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right) \quad (28)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{12} \quad (29)$$

Подставляя (27) и (28) в (9) получим искомое уравнение притока тепла

$$\begin{aligned} & \lambda_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - (c_\varepsilon + 2(3\lambda + 2\mu)\alpha T) \frac{\partial T}{\partial t} - \\ & - (3\lambda + 2\mu)\alpha T \left(\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} \right) \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial t} \right) - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} \left(\frac{\partial \sigma_{22}}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial t} \right) \right) = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

Дифференциальные уравнения (18), (19), (25) и (30) с соответствующими начальными и краевыми условиями относительно напряжений и температуры составляют новую связанную динамическую задачи плоской термоупругости в напряжениях т.е.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial y^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x^2} - \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \sigma_{11}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \sigma_{21}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{12}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{22}}{\partial x \partial y} \right) \\ \lambda_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - (c_\varepsilon + 2\alpha\gamma T) \frac{\partial T}{\partial t} - \\ - \gamma T \left(\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{2\lambda}{3\lambda + 2\mu} \right) \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial t} \right) \right) = 0 \end{cases} \quad (31)$$

с начальными

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(x, y, t)|_{t=0} = \phi_1, \quad \sigma_{22}(x, y, t)|_{t=0} = \phi_2, \quad \sigma_{12}(x, y, t)|_{t=0} = \phi_3, \quad T(x, y, t)|_{t=0} = T_0 \\ \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial t} \Big|_{t=0} = \psi_1, \quad \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial t} \Big|_{t=0} = \psi_2, \quad \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial t} \Big|_{t=0} = \psi_3, \quad \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=0} = \psi_4 \end{aligned} \quad (32)$$

и, граничные условия

$$\sigma_{11}(x, y, t)|_{x=\Gamma} = \bar{\sigma}_0, \quad \sigma_{22}(x, y, t)|_{x=\Gamma} = \bar{\sigma}_0, \quad \sigma_{12}(x, y, t)|_{x=\Gamma} = \bar{\sigma}_0, \quad T(x, y, t)|_{x=\Gamma} = T_1, \quad T(x, y, t)|_{x=\Gamma} = T_2 \quad (33)$$

Методы решения. Для численного решения связанной задачи плоской термоупругости (31-33) конечно-разностным методом могут быть построены явные или неявные схемы. Заменяя в уравнениях (31) производные конечно-разностными соотношениями, получим явную схему:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{11}^{i,j,k+1} - 2\sigma_{11}^{i,j,k} + \sigma_{11}^{i,j,k-1}}{\tau^2} &= \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{11}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{11}^{i,j,k} + \sigma_{11}^{i-1,j,k}}{h_1^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{12}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{12}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{12}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{12}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \\ &+ \frac{\lambda}{\rho} \frac{\sigma_{22}^{i,j+1,k} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i,j-1,k}}{h_2^2} - \gamma \frac{T^{i,j,k+1} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j,k-1}}{\tau^2} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{22}^{i,j,k+1} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i,j,k-1}}{\tau^2} &= \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{22}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i-1,j,k}}{h_2^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{12}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{12}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{12}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{12}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \\ &+ \frac{\lambda}{\rho} \frac{\sigma_{11}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{11}^{i,j,k} + \sigma_{11}^{i-1,j,k}}{h_1^2} - \gamma \frac{T^{i,j,k+1} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j,k-1}}{\tau^2} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{12}^{i,j,k+1} - 2\sigma_{12}^{i,j,k} + \sigma_{12}^{i,j,k-1}}{\tau^2} &= \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\sigma_{11}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{11}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{11}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{11}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \frac{\sigma_{21}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{21}^{i,j,k} + \sigma_{21}^{i-1,j,k}}{h_1^2} + \right. \\ &\left. + \frac{\sigma_{12}^{i,j+1,k} - 2\sigma_{12}^{i,j,k} + \sigma_{12}^{i,j-1,k}}{h_2^2} + \frac{\sigma_{22}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{22}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{22}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{22}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \lambda_0 \left(\frac{T^{i+1,j,k} - 2T^{i,j,k} + T^{i-1,j,k}}{h_1^2} + \frac{T^{i,j+1,k} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j-1,k}}{h_2^2} \right) - (c_e + 2\alpha\gamma T^{i,j,k}) \frac{T^{i,j,k+1} - T^{i,j,k}}{\tau} - \\ - \gamma T^{i,j,k} \left(\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{2\lambda}{3\lambda + 2\mu} \right) \left(\frac{\sigma_{11}^{i,j,k} - \sigma_{11}^{i,j,k-1}}{\tau} + \frac{\sigma_{22}^{i,j,k} - \sigma_{22}^{i,j,k-1}}{\tau} \right) \right) = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

Решив разностные уравнения (34)-(37) относительно $\sigma_{11}^{i,j,k+1}$, $\sigma_{22}^{i,j,k+1}$, $\sigma_{12}^{i,j,k+1}$ и $T^{i,j,k+1}$ соответственно, получим

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^{i,j,k+1} &= \tau^2 \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{11}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{11}^{i,j,k} + \sigma_{11}^{i-1,j,k}}{h_1^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{12}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{12}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{12}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{12}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \right. \\ &\left. + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\sigma_{22}^{i,j+1,k} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i,j-1,k}}{h_2^2} - \gamma \frac{T^{i,j,k+1} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j,k-1}}{\tau^2} \right) + 2\sigma_{11}^{i,j,k} - \sigma_{11}^{i,j,k-1} \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{22}^{i,j,k+1} &= \tau^2 \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{22}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i-1,j,k}}{h_2^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{12}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{12}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{12}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{12}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \right. \\ &\left. + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\sigma_{11}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{11}^{i,j,k} + \sigma_{11}^{i-1,j,k}}{h_1^2} - \gamma \frac{T^{i,j,k+1} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j,k-1}}{\tau^2} \right) + 2\sigma_{22}^{i,j,k} - \sigma_{22}^{i,j,k-1} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{12}^{i,j,k+1} &= \frac{\tau^2 \mu}{\rho} \left(\frac{\sigma_{11}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{11}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{11}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{11}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \frac{\sigma_{21}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{21}^{i,j,k} + \sigma_{21}^{i-1,j,k}}{h_1^2} + \right. \\ &\left. + \frac{\sigma_{12}^{i,j+1,k} - 2\sigma_{12}^{i,j,k} + \sigma_{12}^{i,j-1,k}}{h_2^2} + \frac{\sigma_{22}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{22}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{22}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{22}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} \right) + 2\sigma_{12}^{i,j,k} - \sigma_{12}^{i,j,k-1} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} T^{i,j,k+1} &= \frac{\tau}{c_e + 2\alpha\gamma T^{i,j,k}} \left(\lambda_0 \left(\frac{T^{i+1,j,k} - 2T^{i,j,k} + T^{i-1,j,k}}{h_1^2} + \frac{T^{i,j+1,k} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j-1,k}}{h_2^2} \right) - \right. \\ &\left. - \gamma T^{i,j,k} \left(\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{2\lambda}{3\lambda + 2\mu} \right) \left(\frac{\sigma_{11}^{i,j,k} - \sigma_{11}^{i,j,k-1}}{\tau} + \frac{\sigma_{22}^{i,j,k} - \sigma_{22}^{i,j,k-1}}{\tau} \right) \right) \right) + T^{i,j,k} \end{aligned} \quad (41)$$

Разностные уравнения (38)-(41) с использованием начальных и краевых условий позволяют вычислить значения искомых напряжений и температуры на $(j+1)$ слое по времени.

Известно, что сходимость явных конечно-разностных схем налагает определенное ограничение на размер шага по времени аналогично неравенствам Фридрихса-Куранта.

Можно построить неявные конечно-разностные схемы без вышеназванных ограничений для краевой задачи (31-33):

$$\frac{\sigma_{11}^{i,j,k+1} - 2\sigma_{11}^{i,j,k} + \sigma_{11}^{i,j,k-1}}{\tau^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{11}^{i+1,j,k+1} - 2\sigma_{11}^{i,j,k+1} + \sigma_{11}^{i-1,j,k+1}}{h_1^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{12}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{12}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{12}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{12}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} +$$

$$+ \frac{\lambda}{\rho} \frac{\sigma_{22}^{i,j+1,k} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i,j-1,k}}{h_2^2} - \gamma \frac{T^{i,j,k+1} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j,k-1}}{\tau^2} \quad (42)$$

$$\frac{\sigma_{22}^{i,j,k+1} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i,j,k-1}}{\tau^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{22}^{i,j+1,k+1} - 2\sigma_{22}^{i,j,k+1} + \sigma_{22}^{i,j-1,k+1}}{h_2^2} + \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{12}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{12}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{12}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{12}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} +$$

$$+ \frac{\lambda}{\rho} \frac{\sigma_{11}^{i+1,j,k} - 2\sigma_{11}^{i,j,k} + \sigma_{11}^{i-1,j,k}}{h_1^2} - \gamma \frac{T^{i,j,k+1} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j,k-1}}{\tau^2} \quad (43)$$

$$\frac{\sigma_{12}^{i,j,k+1} - 2\sigma_{12}^{i,j,k} + \sigma_{12}^{i,j,k-1}}{\tau^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\sigma_{11}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{11}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{11}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{11}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \frac{\sigma_{21}^{i+1,j,k+1} - 2\sigma_{21}^{i,j,k+1} + \sigma_{21}^{i-1,j,k+1}}{h_1^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{\sigma_{12}^{i,j+1,k} - 2\sigma_{12}^{i,j,k} + \sigma_{12}^{i,j-1,k}}{h_2^2} + \frac{\sigma_{22}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{22}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{22}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{22}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} \right) \quad (44)$$

$$\lambda_0 \left(\frac{T^{i+1,j,k+1} - 2T^{i,j,k+1} + T^{i-1,j,k+1}}{h_1^2} + \frac{T^{i,j+1,k} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j-1,k}}{h_2^2} \right) - (c_\varepsilon + 2\alpha\gamma T^{i,j,k}) \frac{T^{i,j,k+1} - T^{i,j,k}}{\tau} -$$

$$- \gamma T^{i,j,k} \left(\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{2\lambda}{3\lambda + 2\mu} \right) \left(\frac{\sigma_{11}^{i,j,k} - \sigma_{11}^{i,j,k-1}}{\tau} + \frac{\sigma_{22}^{i,j,k} - \sigma_{22}^{i,j,k-1}}{\tau} \right) \right) = 0 \quad (45)$$

Неявные разностные уравнения (42-45) могут быть приведены к системе уравнений с трёхдиагональной матрицей решаемых методом прогонки: уравнение (42) имеет вид

$$a_i^1 \sigma_{11}^{i+1,j,k+1} + b_i^1 \sigma_{11}^{i,j,k+1} + c_i^1 \sigma_{11}^{i-1,j,k+1} = f_i^1 \quad (46)$$

где

$$a_i = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho h_1^2}, \quad b_i = -\frac{2(\lambda + 2\mu)}{\rho h_1^2} - \frac{1}{\tau^2}, \quad c_i = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho h_1^2}$$

$$f_i = \gamma \frac{T^{i,j,k+1} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j,k-1}}{\tau^2} - \frac{\lambda}{\rho} \frac{\sigma_{22}^{i,j+1,k} - 2\sigma_{22}^{i,j,k} + \sigma_{22}^{i,j-1,k}}{h_2^2} -$$

$$- \frac{2\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\sigma_{12}^{i+1,j+1,k} - \sigma_{12}^{i+1,j-1,k} - \sigma_{12}^{i-1,j+1,k} + \sigma_{12}^{i-1,j-1,k}}{4h_1^2 h_2^2} + \frac{2\sigma_{11}^{i,j,k} - \sigma_{11}^{i,j,k-1}}{\tau^2}.$$

Аналогичным образом, уравнения (43)-(45) могут быть приведены к трёхдиагональному виду

$$a_i^4 T^{i+1,j,k+1} + b_i^4 T^{i,j,k+1} + c_i^4 T^{i-1,j,k+1} = f_i^4 \quad (47)$$

где

$$a_i^4 = \frac{\lambda_0}{h_1^2}, \quad b_i^4 = -\frac{2\lambda_0}{h_1^2} - \frac{c_\varepsilon + 2\alpha\gamma T^{i,j,k}}{\tau}, \quad c_i^4 = \frac{\lambda_0}{h_1^2}$$

$$f_i^4 = \gamma T^{i,j,k} \left(\frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{2\lambda}{3\lambda + 2\mu} \right) \left(\frac{\sigma_{11}^{i,j,k} - \sigma_{11}^{i,j,k-1}}{\tau} + \frac{\sigma_{22}^{i,j,k} - \sigma_{22}^{i,j,k-1}}{\tau} \right) \right) -$$

$$- \lambda_0 \frac{T^{i,j+1,k} - 2T^{i,j,k} + T^{i,j-1,k}}{h_2^2} - \frac{c_\varepsilon + 2\alpha\gamma T^{i,j,k}}{\tau} T^{i,j,k}$$

Определив значения искоемых функций $\sigma(x, t)$ на начальных слоях $j=0$ и $j=1$ и $T(x, t)$ на слое $j=0$ из начальных условий, далее пользуясь граничными условиями, разностные уравнения (46)-(47) могут быть решены методом прогонки или итерационным методом.

Численный пример. Рассмотрим связанную термоупругую задачу о свободной пластине находящегося под действием температурного поле куполообразной формы заданный в начальный момент времени.

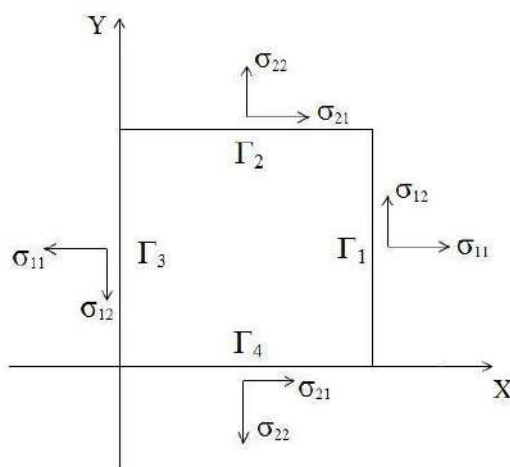


Рис. 1.

Требуется исследовать распределение температурных напряжений по времени в пластине. Задача описывается уравнениями (31-33). При этом начальные и краевые условия для рассматриваемой задачи имеют вид:

начальные условия

$$\sigma_{11}(x, y, t)|_{t=0} = 0, \quad \sigma_{22}(x, y, t)|_{t=0} = 0, \quad \sigma_{12}(x, y, t)|_{t=0} = 0, \quad T(x, y, t)|_{t=0} = T_0 \cdot \sin(\pi x) \sin(\pi y)$$

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0$$

граничные условия

$$\sigma_{11}(x, y, t)|_{x=\Gamma} = 0, \quad \sigma_{22}(x, y, t)|_{x=\Gamma} = 0, \quad \sigma_{12}(x, y, t)|_{x=\Gamma} = 0, \quad T(x, y, t)|_{x=\Gamma} = 0, \quad T(x, y, t)|_{x=\Gamma} = 0.$$

Константы

$$\lambda = 1.5, \quad \mu = 0.5, \quad \lambda_0 = 0.15, \quad \alpha = 0.125, \quad \rho = 0.86, \quad c_\epsilon = 3.4, \quad T_0 = 20, \quad h = 0.1, \quad \tau = 0.01.$$

Таблица 1. Значения напряжений σ_{11}

y=0.5, t=0,08	x=0	x=0.1	x=0.2	x=0.3	x=0.4	x=0.5
Явная схема	0	0.019 2	0.036 5	0.050 3	0.059 2	0.062 3
Неявная схема	0	0.018 8	0.035 7	0.049 2	0.057 8	0.060 8

Таблица 2. Значения напряжений σ_{22}

y=0.5, t=0,08	x=0	x=0.1	x=0.2	x=0.3	x=0.4	x=0.5
Явная схема	0	0.023 3	0.044 3	0.061 0	0.071 8	0.075 5
Неявная схема	0	0.022 8	0.043 5	0.059 9	0.070 4	0.074 1

Таблица 3. Значения температуры T

y=0.5, t=0,08	x=0	x=0.1	x=0.2	x=0.3	x=0.4	x=0.5
Явная схема	0	4.874	9.268	12.753	14.988	15.758
Неявная схема	0	4.896	9.310	12.812	15.060	15.834

Как видно из численных результатов, на основе температурного поля появляются напряжения. Численные результаты полученные на основе явных и неявных конечно-разностных схем достаточно близки.

В предложенной краевой задаче, в отличие от известных связанных задач, неизвестными являются три компоненты тензора напряжений и температура. Разностные уравнения составлены конечно-разностным методом в виде явных и неявных схем. Численно решена плоская задача о термических напряжениях свободной пластины под действием температурных воздействий куполообразной формы. Сравнением результатов явных и неявных схем показано достоверность полученных результатов и справедливость предложенной связанной краевой задачи термоупругости в напряжениях.

Закключение. В статье сформулирована связанная задача плоской термоупругости в напряжениях. При этом, краевая задача состоит из четырех уравнений включая уравнений притока тепла. В предложенной краевой задаче, в отличие от известных связанных задач, неизвестными являются три компоненты тензора напряжений и температура. Разностные уравнения составлены конечно-разностным методом в виде явных и неявных схем. Численно решена плоская задача о термических напряжениях сводной пластины под действием температурных воздействие куполообразной формы. Сравнением результатов явных и неявных схем показана достоверность полученных результатов и справедливость предложенной связанной краевой задачи термоупругости в напряжениях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Новацкий В. Динамические задачи термоупругости.* – М.: Мир, 1970. – 256 с.
2. *Pobedrya B.E. Numerical Methods in the Theory of Elasticity and Plasticity.* -M.: Moscow State University, 1996.-343 p.
3. *Konovalov A.N. Solving problems of elasticity theory under stress.* Novosibirsk: NSU, 1979. - 92 p.
4. *R.V.N. Melnik. Discrete models of coupled dynamic thermoelasticity for stress-temperature. Applied Mathematics and Computation.*12292001), p.107-132
5. *Kartashov E.M. Model representations of heat shock in terms of dynamic thermal elasticity. Russian Technological Journal.* 2020;8(2), p.85-108
6. *Pobedrya B.E. On Static Problem in terms of Stresses. Moscow Univ. Mech. Bull.* 58 (3), 8-14 (2003).
7. *Borodachev N.M. Stress Solutions to the Three-Dimensional Problem of Elasticity. Intern. Appl. Mech.* 42 (8), 849-878 (2006).

ШЎРЛАНГАН ГИДРОМОРФ ТУПРОҚЛАРДА ҒЎЗАГА АЗОТЛИ ЎҒИТЛАРНИ КИРИТИШНИНГ ТАЪСИРИ

Ҳасанов Иқром Ҳасановия,

Бухоро Давлат университети ўқитувчиси, қишлоқ хўжалиги фанлари номзоди

Аннотация. Мақолада Бухоро вилоятининг гидроморф (ер ости сувлари яқин) тупроқлари шароитида тупроқ шўрланиш даражасининг ғўза ҳосилдорлигига ва минерал ўғитлар самарадорлигига таъсири ёритилган. Тадқиқотлар давомида шўр ювиш жараёнида озуқа элементларининг (нитрат, калий) ювилиб кетиш динамикаси, шунингдек, турли меъёрдаги азотли ўғитларнинг Бухоро-6 ва С-6037 ғўза навларининг технологик сифати ва пахта наводорлигига таъсири ўрганилган. Олинган натижалар шуни кўрсатадики, кучли шўрланган ва гидроморф тупроқларда азот меъёрини 200 кг/га гача ошириш иқтисодий жиҳатдан самарасиз бўлиб, пахтанинг биринчи нав чиқишини камайтириши мумкин.

Калим сўзлар: тупроқ шўрлигининг унумдорликка таъсири, азот режими, азот бирикмаларининг динамикаси, уруғ нави.

ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ХЛОПЧАТНИК НА ЗАСОЛЕННЫХ ГИДРОМОРФНЫХ ПОЧВАХ

Аннотация. В статье рассматривается влияние степени засоления гидроморфных почв Бухарской области на урожайность хлопчатника и эффективность минеральных удобрений. Исследована динамика вымывания питательных веществ (нитратов, калия) в процессе промывки солей, а также воздействие различных норм азотных удобрений на технологические характеристики и сортность хлопка-сырца сортов «Бухара-6» и «С-6037». Результаты показывают, что на сильносолончаковых и гидроморфных почвах увеличение нормы азота до 200 кг/га экономически не оправдано и может привести к снижению выхода хлопка первого сорта.

Ключевые слова: влияние засоленности почв на продуктивность, режим азота, динамика азотных соединений, сортимент.

THE EFFECT OF APPLYING NITROGEN FERTILIZERS ON COTTON IN SALINE HYDROMORPHIC SOILS

Abstract. The article examines the influence of soil salinity levels in the hydromorphic soils of the Bukhara region on cotton yield and the effectiveness of mineral fertilizers. The dynamics of nutrient leaching (nitrate, potassium) during the desalination process (leaching irrigation) were studied, alongside the impact of various nitrogen fertilizer rates on the technological quality and commercial grading of "Bukhara-6" and "S-6037" cotton varieties. The findings indicate that increasing nitrogen rates up to 200 kg/ha in highly saline and hydromorphic soils is economically inefficient and can lead to a decrease in the yield of first-grade cotton.

Keywords: effect of soil salinity on productivity, nitrogen regime, nitrogen compound dynamics, seed variety.

Адабиётларда С.Н.Рыжев, Н.Л.Малинкин [4,5] пахтачиликда тупроқнинг бир метрли қатламида куруқ қолдиқ 1 % ни, хлор эса 0,05 % ни ташкил қилганида ғўзага минерал ўғитлар киритмасликни тавсия этганлар. В.А.Ковга [3], Г.А.Талипов[7], С.Алимаганбетов [1] шўри ювиладиган ғўза майдонларига чигит экишдан олдин ёки экиш жараёнида, вегетация даврида бир марта 40-50 кг/га азот ва фосфорни киритишни тавсия этганлар.

Гидроморф тупроқлар республика экин майдонларининг ярмисини ташкил қилади. Бу майдонларда ер ости сувлари ер юзасига яқин жойлашганлиги, ғўзаларга азотли ўғитлар қўллаш меъёрлари, ўрта ва ингичка толали ғўзаларга киритиш шакллари ва усулларининг таъсири, шунингдек шўрланиш даражасининг ҳосилдорликка нитрат ва аммоний динамикасига таъсири Бухоро тажриба станцияси ва Бухоро туманидаги “Лейлак-лоша” фермер хўжаликлари далаларида кўп йиллик тажрибаларда ўрганилди.

BIOLOGY

Бухоро вилоятида экин ерларининг 19,3 минг гектари енгил қумлоқли, 19,5 минг ўрта қумлоқли ва 7,7 минг гектари оғир қумлоқли, жами шўрланган майдонлар 76,5 минг гектарни, кучсиз шўрланган майдонлар 113 минг гектарни ташкил қилади.

“Нима сабабдан гидроморф тупроқлар шўрланади?” деган савол туғилиши табиий. Бундай тупроқларда ер ости сувлари яқин жойлашганлиги, тупроқ юзасидан ва ўсимликлар орқали сувнинг буғланиши, вегетация даврида йиллик бериладиган сувга нисбатан 10 марта кўп сув буғланади. Натижада ўсимликлар учун зарарли тузлар (хлоридлар, сульфатлар, ишқорлар) тупроқни шўрлантиради. Тузларни ювиш эса куз-қиш мавсуми давомида амалга оширилади. Бунда ҳар гектар майдонда 3-6 минг м³ миқдорида суғорилиб, кейин экилади. Акс ҳолда экинлар ўсмайди.

Тупроқ шўрланиши ва азотли ўғитлар меъёрларининг пахта ҳосилига таъсири (0-100 см)

1-жадвал

Азот, йиллик	кам шўрланган (хлор-0,02 %, курук қолдиқ - 0,4 %, ўртача)			ўрта шўрланган (хлор-0,04 %, курук қолдиқ - 0,8 %)			ўтлоқ-ботқоқ (хлор-0,01 %, курук қолдиқ - 0,2 %)			кам шўрланганга нисбатан пахта ҳосилининг камайиши, %	
меъёри кг/га	4 йилда ўртача пахта ҳосили, ц/га	кўши мча, ц/га	%	2 йилда ўртача пахта ҳосили, ц/га	кўши мча, ц/га	%	2 йилда ўртача пахта ҳосили, ц/га	кўши мча, ц/га	%	ўрта шўрланган	ўтлоқ-ботқоқ тупроқ
-	21,7	-	-	89,1	-	-	14,7	-	-	88	68
100	28,3	6,6	130	22,6	3,5	118	19,8	5,1	135	80	70
150	32,1	10,4	148	22,9	3,8	120	22,5	7,8	153	71	70
200	34,1	12,4	157	21,2	2,1	111	23,1	8,4	157	62	68
ўртача	31,7	10	145	22,1	3	116	21,3	6,6	145	71	69

Ўрта ва кучли шўрланган экин ерлари республикамызда 42 %, Бухоро вилоятида 60 % майдонни ташкил қилади. Бундай тупроқларда ўтлоқ-ботқоқли тупроқларда ўтказилган тажрибаларда, кам шўрланган тупроқларда 4 йилда ўртача пахта ҳосилини 10 ц/га (45%), ўрта шўрланган тупроқда 2 йилда ўртача 3,0 ц/га (16%) ва ўтлоқ-ботқоқ тупроқда 6,64 ц/га (45%), азотли ўғитлар ўрта шўрланган тупроқда (30%), ўтлоқ-ботқоқ тупроқда 33 % ни ташкил қилди (жадвал 1).

Ўрта шўрланган ва ўтлоқ-ботқоқ тупроқларда ғўзаларга 200 кг/га азотли ўғитларни бир меъёрда қўллаш иқтисодий жиҳатдан харажатларни қопламади.

Шўр ювишнинг шўрлар ва озуқа моддалар динмакасига таъсири (0-100 см, %)

2-жадвал

Фон	Хлор-ион	Сульфат иони	N-NO ₃	K ₂ O
Бедапоядан сўнг	31,9	36,3	72,4	52,6
Кам шўрланган	3,9	33,6	53,3	46
Ўрта шўрланган	31,9	58,7	28,6	54,1
Кучли шўрланган	46,7	162	39	103
Бедапояга нисбатан, %	10	93	74	87

Бухоро вилоятида 2 марта шўр ювиш натижасида гидроморф тупроқларда бедапоядан сўнг 1 м. қатламида хлор иони – 32 %, сульфат иони – 36%, нитрат азоти – 72 % ва калий – 53 % га камайди. Кам шўрланган тупроқда бу кўрсаткичлар 32 % дан 46 % ни ташкил қилди.

Кучли шўрланган майдонда эса, нитрат азотининг юқилиши 74 % ни, калий оксиди – 87 % ни ташкил қилди, яъни камайди (жадвал 2).

Шўр ювишнинг тузлар ва озуқа моддаларнинг ер ости сувларидаги миқдори. мг/л (2016)

3-жадвал

Кўрсаткичлар	Бедапоядан сўнг			Кам шўрланган			Кучли шўрланган		
	сувгача	сувдан сўнг	%	сувгача	сувдан сўнг	%	сувгача	сувдан сўнг	%

BIOLOGY

хлор-ион	1,8	1,2	67	1,7	1,2	71	9	4,8	53
куруқ қолдик	26	6,6	65	36	23,2	64	148	61,4	41
N-NO ₃	29	8	28	137	64	47	98	70	71
K-K ₂ O	78,4	37,2	47	33,6	18,1	54	38,1	17,5	46

Тупроқ қанча унумдор, кам шўрланган бўлса, тузлар ва озуқа моддалари (70%) ювилади. Тупроқ кучли шўрланишида эса куруқ қолдик миқдори 65 % ва 41 % ни, нитрат азоти 28,47 ва 71% ни, калий оксиди 47 % ни ташкил қилди. (жадвал 3)

Вўзани суғоришнинг ер ости сувларидаги нитрат ва аммоний азотлари динамикасига таъсири (мг/л, 2016)

4-жадвал

Вар.	Азот формаси, кг/га	Суғоришлар				Вегетация охирида
		1	2	3	4	
назорат	-NO ₃	0,1	3,6	4,7	3,5	0,1
	-NH ₄	0,8	0,5	2,7	1,5	0,4
	жами	0,9	4,1	7,4	5	0,5
100	-NO ₃	3,5	2,6	4,5	3,6	2,6
	-NH ₄	3,5	4	3,7	3,5	3,5
	жами	7	6,6	8,2	7,1	6,1
200	-NO ₃	3,5	3,2	2,2	2,6	4
	-NH ₄	3,5	3,2	2,2	2,6	4
	жами	7	6,4	4,4	5,2	8

Азотли ўғитларни гидроморф тупроқда ўзаларга қўллашда аммоний азотини миқдори нитратга нисбатан 2-3 марта кўпайтирди. Азот меъерининг оширилиши, ер ости сувида ҳам унинг кўпайиши сақлаб қолинди, вегетация охирида эса бир хиллиги аниқланди (жадвал 4).

Азотли ўғит меъерининг ўтлоқ-ботқоқ тупроқда ва ер ости сувларидаги нитрат азоти миқдорига таъсири (2015-2016, ўртача) (0-100 см, мг/л)

5-жадвал

Азот меъери, мг/кг	экиш олдида	гуллашда	3-суғориш	4-суғориш
-	6,2	4,8	-	-
100	9,3	6,3	8,9	-
200	8,6	6,1	16,8	15
ер ости суви, мг/л	1,4	1,6	2,1	3,9

Ўтлоқ-ботқоқ тупроқда ўзага киритилган азотли ўғитлар меъерининг тупроқ ва ер ости сувларидаги миқдори 2 йилда ўртача 2-суғоришгача тупроқда кўпроқ бўлиши, 3-4-суғоришларда эса тупроқ қатламида мавжуд бўлмаслиги аниқланди. Азотли ўғитлар киритилганда эса тупроқ қатламида 15-16 мг/кг ва ер ости сувларида 3,9 мг/л гача кўпайиши кузатилди (жадвал 5).

Тупроқ шўрланишининг ўзани 5-10-14 баргларидаги нитрат азоти ва фосфор миқдорининг технологик сифатида таъсири (2 йилда ўртача)

6-жадвал

Азот нормаси, кг/га	кам шўрланган, 0,4 %		Ўрта шўрланган (0,8%)		%		тола узунлиги, мм	тола чиқиши, %	1000 дона чигит оғирлиги, г
	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅			
-	17	145	200	153	1176	90	35,1	36	107
100	100	107	750	73	750	73	35,5	39,6	116,3
200	800	107	1000	73	125	68	36,5	36,1	116,2

Тупроқ шўрланишининг ошиши билан (жадвал 6) ўза баргидаги нитрат азотининг миқдори 1176 % кўпайди, фосфор миқдори эса ўзгармади. Азот меъерининг оширилиши тупроқ эритмасининг

BIOLOGY

концентрацияси кўпайиши туфайли камайди. Тола узунлиги ўзгармади, тола чиқиши 3 % ва минг дона чигит вазни 9 % га ошди.

Ѓўзада ўтлоқ-ботқоқ тупроқда аммоний азоти динамикасига таъсири (0-100 см, мг/кг, 2 йилда ўртача)

7-жадвал

Азот меъёри, кг/га	Экиш олдидан. 15.04	%	Шоналашда		Гуллашда		Вегетация охирида	
			21.VI	%	04.VII	%	23.IX	%
-	188	100	259	100	233	100	73	100
100	214	114	466	180	317	146	54	56
200	196	109	387	149	272	108	55	56

Ўтлоқ-ботқоқ тупроқда ғўзага азотли ўғитлар киритиш, тупроқдаги аммоний азотининг шоналаш фазасида 80 %, гуллашда – 46 % ва вегетация охирида 44 % камайди. Азот меъёри оширилишининг тупроқдаги аммоний азоти миқдорига таъсири сезилмади (жадвал 7)

Азот ўғити меъёрининг пахта ассортиментига таъсири (2 йилда ўртача)

Жадвал 8

Азот нормаси, кг/га	ғўза навлари	1-нав	%	3-нав	%
-	С-6037	83,2	100	17	
	Бух-6	96,5	100	3,5	
100	С-6037	82,7	-0,5	17,3	
	Бух-6	94,3	-2,2	5,7	
200	С-6037	72,7	-10,5	27,3	
	Бух-6	94,5	-1	9	

2 йилда ўртача Бухоро-6 навида (жадвал 8) 1-нав пахта 96 %, С-6037 навида 83 % ни ташкил қилди. Азотли ўғитларни ғўзаларга киритиш 1-нав ҳосилни 10 центнергача камайтирди. Азот меъёрининг оширилиши иккала тур ғўзада ҳам 3-нави ҳосилни кўпайтиради.

АДАБИЁТЛАР:

1. Алимаганбетов С. – “Эффективность азотных удобрений на засоленных почвах” ж. «Хлопководство» № 6. 1969 с-62-63
2. Агрохимические свойства почв и влияние удобрений на развитие хлопчатника. Ташкент, изд. АН УЗССР, 1960 с-68-72
3. Ковда В.А. – Происхождение и режим засоленных почв. Том 1, изд. АН СССР, 1947 с-108-130
4. Малинkin Н.Л. – Роль удобрений в повышении плодородия почв и урожайности хлопчатника в Узбекистане “Агрохимическая характеристика почв СССР. 1967. Москва, с-250-262”
5. Рыжев С.Н. – Эффективность удобрений хлопчатника на засоленных землях. ж. «Хлопководство» №1, 1970. с-28-30
6. Талипов Г.А. – Земельные ресурсы Узбекистана и проблемы их рационального использования. Ташкент. 1992. с-23-126
7. Хасанов И.Х. – Эффективность азотных удобрений при внесении их под хлопчатник на луговых почвах Бухарской области. Авт.канд.дисс. Ашхабад. 1967. с-32-36

ARPA VA UNING KIMYOVIY TARKIBI

Evatov G'iyos Xamza o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti assistent o'qituvchisi

[*giyosjonevatov@gmail.com*](mailto:giyosjonevatov@gmail.com)

Eshmurodova Zarnigor,

Qarshi davlat texnika universiteti talabasi

[*eshmurodovazarnigor92@gmail.com*](mailto:eshmurodovazarnigor92@gmail.com)

Annotatsiya. Ushbu tadqiqot arpa va pivo arpasining kimyoviy tarkibini kraxmal tuzilishi, oqsillar funktsionalligi, lipidlar harakati, mineral balansi va ikkilamchi metabolitlarini kompleks tahlil qilish orqali o'rganadi. Topilmalar shuni ko'rsatadiki, arpa sifati izolyatsiya qilingan komponentlar emas, balki bir nechta biokimyoviy tizimlarning o'zaro ta'siri bilan belgilanadi. Maltlash samaradorligini, fermentatsiya barqarorligini va mahsulotning mustahkamligini oshirish uchun kompleks baholash yondashuvi taklif etiladi.

Kalit so'zlar: arpa, pivo arpa, kraxmal, oqsillar, lipidlar, minerallar, fenollar, pivo tayyorlash.

BARLEY, MALTING (BREWING) BARLEY VARIETIES, AND THE CHEMICAL COMPOSITION OF BARLEY

Abstract. This study investigates the chemical composition of barley and brewer's barley through an integrated analysis of starch structure, protein functionality, lipid behavior, mineral balance, and secondary metabolites. The findings demonstrate that barley quality is determined by the interaction of multiple biochemical systems rather than isolated components. A comprehensive evaluation approach is proposed to enhance malting efficiency, fermentation stability, and product consistency.

Keywords: Barley, brewer's barley, starch, proteins, lipids, minerals, phenolics, brewing.

ЯЧМЕНЬ, ПИВОВАРЕННЫЕ СОРТА ЯЧМЕНЯ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЯЧМЕНЯ

Аннотация. В данном исследовании изучается химический состав ячменя и пивоваренного ячменя посредством комплексного анализа структуры крахмала, функциональности белка, липидного обмена, минерального баланса и вторичных метаболитов. Результаты показывают, что качество ячменя определяется взаимодействием множества биохимических систем, а не изолированными компонентами. Предлагается комплексный подход к оценке для повышения эффективности соложения, стабильности ферментации и стабильности качества продукта.

Ключевые слова: Ячмень, пивоваренный ячмень, крахмал, белки, липиды, минералы, фенолы, пивоварение.

Kirish. Arpa eng qadimiy va keng tarqalgan donli ekinlardan biri bo'lib, ozuqaviy xususiyatlari va sanoatda qo'llanilishi bilan baholanadi. Uning ahamiyati, ayniqsa, pivo ishlab chiqarishda yaqqol namoyon bo'ladi, bu erda pivo arpasi - malting uchun optimallashtirilgan ehtiyotkorlik bilan tanlangan navlar - asosiy xom ashyo bo'lib xizmat qiladi. Pivo tayyorlashda arpaning texnologik sifati uning kimyoviy tarkibiga, jumladan, kraxmal tarkibi va tuzilishiga, oqsil fraksiyalariga, lipid profiliga, mineral elementlarga va ikkilamchi metabolitlarga bog'liq. Ushbu komponentlar birgalikda malting samaradorligini, fermentlangan shakar hosildorligini, fermentativ faollikni va yakuniy mahsulotning hissiy xususiyatlarini aniqlaydi.

Magniy, fosfor, rux kabi minerallar unib chiqish va maltlanish jarayonida fermentativ reaksiyalarda kofaktor vazifasini bajaradi. Ikkilamchi metabolitlar, shu jumladan, fenolik moddalar antioksidant quvvatga va rang hosil bo'lishiga yordam beradi. Ushbu biokimyoviy o'zaro ta'sirlarni tushunish pivo tayyorlash uchun arpani optimallashtirish uchun juda muhimdir.

Ushbu tadqiqot arpa va pivo arpasining kimyoviy tarkibini har tomonlama baholash, makromolekulalar, minerallar va metabolitlar o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlashga qaratilgan bo'lib, shu bilan solod sifati va pivo sifati yaxshilash uchun ilmiy asos yaratadi.



(1-rasm) 70-75 kunlik arpa boshog'i

(1-rasm) Rasmda kech vegetativ bosqichda 70-75 kunlik arpa qulog'i ko'rsatilgan. Yashil spikeletlar to'liq shakllangan va ayvonlar tashqi tomonga cho'zilgan, bu sog'lom o'sishni ko'rsatadi. Don boshlari cho'zilgan va zich joylashgan bo'lib, ular normal rivojlanishni va reproduktiv va pishib etish fazalariga o'tishga tayyorligini aks ettiradi.

(2-rasm) Pivo uchun eng maqul keladigan arpaning piship yetilgani ask etadi.

ARPA DONINING TIPIK KIMYOVIY TARKIBI

1-jadval.

Kimyoviy komponent	Tarkib (foiz, taxminiy diapazon)
Kraxmal (Starch)	55 – 65 %
Xom oqsil (Protein)	9 – 13 % (ba'zi navlarda 10 – 17 %)
Lipidlar (Yog'lar)	2 – 3 %
β -Glukanlar / Xun tolasi	4 – 9 %
Kul (Mineral moddalari)	1.5 – 2.5 %
Namlik (umumiy don holatida)	12 – 14 % (quruq modda hisobiga kirmaydi)

Tadqiqotning maqsadi va vazifalari. Ushbu tadqiqotning maqsadi kraxmal, oqsil, lipid, mineral va ikkilamchi metabolit komponentlari malting samaradorligi va pivo sifatiga birgalikda qanday ta'sir qilishini tushunishga qaratilgan arpa va pivo arpasining kimyoviy tarkibini har tomonlama o'rganishdir. Tadqiqot ushbu biokimyoviy tarkibiy qismlar o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlash va ularning fermentatsiya jarayonlariga va mahsulot barqarorligiga funksional ta'sirini aniqlashga qaratilgan.

Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi: birinchidan, kraxmal tuzilishini, shu jumladan, granular morfologiyasini va amiloza-amilopektin nisbatini tahlil qilish va uning shakarlanishga ta'sirini baholash; ikkinchidan, oqsil fraksiyalari va ularning eruvchanlik dinamikasini azotning azot mavjudligiga qarab baholash; uchinchidan, lipidlar miqdorini aniqlash va fenolik antioksidantlar bilan o'zaro ta'sirini o'rganish; to'rtinchidan, mineral tarkibini va uning fermentativ faollikdagi katalitik rolini aniqlash; va beshinchidan, ikkilamchi metabolitlarning oksidlanish barqarorligiga va rang shakllanishiga ta'sirini baholash. Ushbu vazifalarni bajarish arpani solod va pivo tayyorlash uchun optimallashtirish uchun zarur bo'lgan keng qamrovli biokimyoviy profilni beradi.

Tadqiqot mavzusi va obyekti. Ushbu tadqiqot obyekti arpa, shu jumladan, umumiy qishloq xo'jaligi navlari va maltlash uchun maxsus etishtirilgan pivo arpasidir. Tadqiqotda asosiy e'tibor donning biokimyoviy tarkibi va uning solod va pivo tayyorlash jarayonida texnologik ko'rsatkichlarga aloqadorligiga qaratilgan.

Tadqiqot mavzusi arpa va pivo arpasining kimyoviy komponentlari o'rtasidagi o'zaro bog'liqlik va ularning solod sifati, fermentativ faolligi, fermentatsiya samaradorligi va yakuniy mahsulot barqarorligini

aniqlashdagi funksional rollari. Bunga kraxmalning tarkibi va tuzilishi, oqsillarning fraksiyasi va eruvchanligi, lipid profillari va ularning oksidlanish o'zaro ta'siri, mineral tarkibi va ikkilamchi metabolitlari kiradi. Obyektni ushbu subyektlarning obyektiv orqali o'rganish orqali tadqiqot o'ziga xos biokimyoviy xususiyatlar texnologik natijalarni qanday boshqarishini aniq tushunishga qaratilgan. Tadqiqot sanoat pivo ishlab chiqarish jarayonlari uchun arpani baholash va optimallashtirishga tizimli yondashuvni o'rnatish uchun ushbu omillarni ajratib turadi.

Ishning ilmiy yangiligi. Ushbu tadqiqotning ilmiy yangiligi arpa va pivo arpasini izolyatsiya qilingan komponentlar majmuasi sifatida emas, balki murakkab biokimyoviy tizim sifatida integratsiyalashgan tekshirishdadir. Kraxmal, oqsillar yoki lipidlarni mustaqil ravishda ko'rib chiqadigan an'anaviy tahlillardan farqli o'laroq, ushbu tadqiqot kraxmal granulari morfologiyasi, oqsilning eruvchanligi dinamikasi, lipid-fenol o'zaro ta'siri, mineral balansi va ikkilamchi metabolitlarning malting samaradorligi va pivo sifatiga o'zaro bog'liq ta'sirini o'rganadi.

Ushbu yondashuv kraxmal strukturasi heterojenligining fermentativ shakarlanishga ta'siri, fermentatsiya ko'rsatkichlarida umumiy konsentratsiyadagi oqsil eruvchanligi roli va lipid oksidlanishiga fenolik birikmalarning muvozanatlashtiruvchi ta'siri kabi ilgari baholanmagan funksional munosabatlarni aniqlash imkonini beradi. Ushbu omillarni yaxlit asosga integratsiyalashgan holda, tadqiqot malting va pivo tayyorlashda arpa samaradorligini bashorat qilish uchun ko'p o'lchovli modelni taklif qiladi. Ushbu keng qamrovli istiqbol pivo sanoatida etishtirish, qayta ishlash va sifatni baholash amaliyotini optimallashtirish uchun ilmiy asos bo'lib, don kimyosi va don texnologiyasi bo'yicha tadqiqotlarga yangi hissa qo'shadi.

Natijalar. Arpa va pivo arpasining analitik bahosi bir nechta muhim biokimyoviy topilmalarni keltirib chiqardi, ular malting va pivo tayyorlash paytida donning funksional xatti-harakatlarini birgalikda yoritib beradi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, yadroning kimyoviy arxitekturasini kraxmal tuzilishi, oqsil tarkibi, lipidlarning tarqalishi, minerallarning ko'pligi va ikkilamchi metabolitlarning muvofiqlashtirilgan o'zaro ta'siri orqali shakllanadi.

Kraxmalning miqdoriy tahlillari barcha namuna guruhlarida amilopektinning amilozadan ustunligini aniqladi, garchi bu nisbat tor, ammo texnologik jihatdan mazmunli diapazonda o'zgargan. O'rtacha iqlimiy stressga ega bo'lgan hududlardan olingan namunalar amiloza darajasini biroz ko'tardi, bu uglevod biosintezidagi moslashuvchan o'zgarishlarni ko'rsatishi mumkin. Kraxmal granulari mikroskopiyasi katta lentikulyar granular va kichikroq sharsimon bo'lganlar bilan ajralib turadigan bimodal taqsimot naqshini tasdiqladi. Yuzaki nosimmetrikliklar yuqori bo'lgan granular fermentativ parchalanishga yuqori sezuvchanlikni ko'rsatdi va shu bilan shakarlanish samaradorligi bilan ijobiy bog'liqlik ko'rsatdi. Ushbu topilmalar, ma'lum darajada, kraxmal morfologiyasi solod sifatida muhim rol o'ynaydi [1]. Biroq hozirgi tadqiqot gidrolitik kinetikaga faqat kimyoviy tarkib emas, balki granularlarning heterojenligi hal qiluvchi ta'sir ko'rsatishini ko'rsatish orqali bu tushunchani kengaytiradi.

Protein fraksiyasi albuminlar, globulinlar, hordeinlar va glutelinlar orasida aniq farqlanishga olib keldi. Hordeinlar dominant saqlash oqsillarini ifodalagan, ammo ularning nisbati ekologik mintaqalarda sezilarli darajada farq qilgan. Ko'tarilgan hordein tarkibi pastroq protein eruvchanlik indeksleri bilan bog'liq bo'lib, bu o'z navbatida azotning mavjudligiga ta'sir qildi. Garchi adabiyotlarda azot tarkibi to'g'ridan-to'g'ri ma'lum protein guruhlari muvozanatini aks ettiradi [2].

Lipid profilini o'rganish shuni ko'rsatdiki, pivo arpa tarkibida kamtarona, ammo funksional jihatdan kuchli lipid fraksiyasi mavjud bo'lib, asosan neytral lipidlardan iborat bo'lib, oz miqdorda glikolipidlar va fosfolipidlar mavjud. Yuqori dala haroratiga duchor bo'lgan namunalar to'yinmagan yog'li kislotalarning ko'payishini ko'rsatdi, bu lipidlar biosinteziga atrof-muhit ta'sirida o'zgarishlarni nazarda tutadi [3].

Xususan, ma'lumotlar shuni ko'rsatdiki, lipidlarning oksidlanishi don tarkibida tabiiy ravishda mavjud bo'lgan fenolik antioksidantlar tomonidan boshqariladi, bu esa lipidlarning salbiy xatti-harakatlarini endogen himoya birikmalari bilan qisman yumshatish mumkinligini ko'rsatdi. Bu boshqa adabiyotlarda yetarlicha tan olinmagan yadro ichidagi muvozanat mexanizmini ko'rsatadi.

Xulosa. Ush tadqiqot arpa va pivo uchun arpaning tarkibini tizimli tarzda o'rganishga solish. Tadqiqot tomoni shuni ko'rsatdiki, arpa sifati faqat aniqlangan komponentlar – kraxmal, quvvat, lipid va mineral resurslar bilan belgilanmaydi, balki xavfsizlik o'zaro biologik va tashqi ta'sirga asoslangan. Kraxmal granulararining va enzymatik parchalanish shaklini belgilab, ferment hosil hosil bo'lishini ta'minlash. Oqsillarning eruvchanligi va molekulyar tuzilishi wortdagi azot miqdori va fermentatsiya jarayonining sifatini nazorat qiladi. Lipidlar va fenoliklarni o'z tarkibidagi metabolik oksidlanish antioksidantligi, ta'm sifati va ko'piklash qobiliyatiga ta'sir qiladi. Mineral moddalar va esa enzymatik grainning umumiy ishlab chiqarishligini qo'llab- faolligini namoyon etadi.

ADABIYOTLAR:

1. O'zbekiston donchilik tadqiqotlari jurnali, Usmonaliyev K., "Arpa donida kraxmal strukturasining texnologik funksiyalari," 2020, 14-may, 38–47-betlar.
2. Oziq-ovqat sanoati ilmlari, Nurmatova D., "Pivobop arpadagi uz fraksiyalarining funksionali," 2022, 7-iyun, 59–68-betlar.
3. Fermentatsiya Texnologiyasi va sifatshunoslik, Alimov B., "Arpa lipidlarining oksidlanish jarayonlariga ta'siri," 2021, 22-sentabr, 81–92-betlar.

OZIQ-OVQAT MAHSULOTLARIDAGI BIOGEN AMINLARNI ANIQLASHNING XROMATOGRAFIK KEMOMETRIK USULLARI

Jurayev Ruzimurod Sattorovich,

Qarshi davlat texnika universiteti

Sanoat muhandisligi va menejmenti kafedrası katta o'qituvchisi

r.jurayev@kstu.uz

Umurkulova Firuza Suvonkulovna,

Qarshi davlat texnika universiteti

Shahrisabz oziq-ovqat mahsulotlari kafedrası katta o'qituvchisi

feruzaumirkulova5@gmail.com

Suyunova Lola Abduholiqovna,

Qarshi davlat texnika universiteti

Shahrisabz oziq-ovqat mahsulotlari kafedrası assistenti

Suyunovalola880@gmail.com

Misirova Sojida Azamatovna,

Qarshi davlat texnika universiteti talabasi

Misirovasojida01@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada oziq-ovqat mahsulotlaridagi biogen aminlarni aniqlashning zamonaviy xromatografik-kemometrik usullari keng qamrovda tahlil qilinadi. Biogen aminlar oqsilli mahsulotlarda mikrobiologik parchalanish natijasida hosil bo'ladigan biologik faol birikmalar bo'lib, ularning ortiqcha miqdori inson salomatligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Xususan, gistamin, tiramin, putressin va kadaverin kabi aminlar oziq-ovqat zaharlanishi, allergik reaksiyalar hamda toksik ta'sirlarni yuzaga keltirishi mumkin. Tadqiqotda yuqori samarali suyuq xromatografiya (HPLC), gaz xromatografiyasi (GC) hamda ularning detektor tizimlari yordamida aniqlash usullari ko'rib chiqiladi. Shuningdek, olingan natijalarni qayta ishlashda kemometrik yondashuvlar – ko'p o'zgaruvchili statistik tahlil, regressiya modellari va ma'lumotlarni tasniflash usullarining ahamiyati yoritilgan. Ushbu integrallashgan yondashuv aniqlik, sezgirlik va ishonchlilikni oshirishga xizmat qiladi hamda oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi.

Kalit so'zlar: biogen aminlar, oziq-ovqat xavfsizligi, xromatografik usullar, kemometrik tahlil, gaz xromatografiyasi.

ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ И ХЕМОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ АМИНОВ В ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ

Аннотация. В данной статье проводится всесторонний анализ современных хроматографических и хеометрических методов определения биогенных аминов в пищевых продуктах. Биогенные амины образуются в результате микробиологического разложения белковых соединений и могут представлять потенциальную опасность для здоровья человека при превышении допустимых концентраций. Такие соединения, как гистамин, тирамин, путресцин и кадаверин, способны вызывать пищевые отравления, аллергические реакции и токсические эффекты. В работе рассмотрены методы высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ, HPLC) и газовой хроматографии (ГХ, GC), а также особенности их детекторных систем. Особое внимание уделено применению хеометрических подходов, включая многомерный статистический анализ, регрессионные модели и методы классификации данных для повышения точности и достоверности результатов. Комплексное использование хроматографических и хеометрических методов способствует повышению чувствительности анализа и играет важную роль в обеспечении безопасности пищевых продуктов.

Ключевые слова: Биогенные амины, безопасность пищевых продуктов, хроматографические методы, хеометрический анализ, вэжх, газовая хроматография.

CHROMATOGRAPHIC AND CHEMOMETRIC METHODS FOR THE DETERMINATION OF BIOGENIC AMINES IN FOOD PRODUCTS

Abstract. *This article provides a comprehensive analysis of modern chromatographic and chemometric methods for the determination of biogenic amines in food products. Biogenic amines are biologically active compounds formed through the microbial decarboxylation of amino acids in protein-rich foods. Excessive accumulation of compounds such as histamine, tyramine, putrescine, and cadaverine may pose significant health risks, including food poisoning, allergic reactions, and toxic effects. The study examines analytical techniques such as High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) and Gas Chromatography (GC), along with their detector systems used for accurate identification and quantification. In addition, the role of chemometric approaches, including multivariate statistical analysis, regression modeling, and data classification techniques, is discussed in order to improve analytical precision and reliability. The integration of chromatographic techniques with chemometric data processing enhances sensitivity, selectivity, and overall efficiency, thereby contributing significantly to ensuring food safety and quality control.*

Keywords: *Biogenic amines, food safety, chromatographic methods, chemometric analysis, hplc, gas chromatography.*

Kirish. Oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlash inson salomatligi va farovonligini mustahkamlash uchun muhim omil bo'lib, Birlashgan Millatlar Tashkilotining Barqaror Rivojlanish maqsadlarida alohida ta'kidlangan. So'nggi yillarda proteinli oziq-ovqat mahsulotlarida biogen aminlarning mavjudligi jamoatchilik e'tiborini tortayotgan dolzarb masalalardan biriga aylandi. Biogen aminlar - organizmlar tomonidan sintezlanadigan, metabolizmida muhim rol o'ynaydigan tabiiy bioaktiv birikmalardir [1]. Ular asosan baliq, go'sht, pishloq, sabzavotlar, fermentlangan ichimliklar (vino, pivo) va boshqa oziq-ovqat mahsulotlarida uchraydi. Oziq-ovqat tarkibidagi eng keng tarqalgan biogen aminlarga gistamin, tiramin, putressin, kadaverin, spermin va spermidin kiradi. Biogen aminlarning organizmda fiziologik funksiyalari mavjud bo'lsa-da, ularning oziq-ovqat mahsulotlarida yuqori konsentratsiyada to'planishi jiddiy salomatlik muammolariga olib kelishi mumkin [2]. Xususan, gistamin bilan zaharlanish (skombrotoksin) bosh og'rig'i, ko'ngil aynishi, qusish, teri qizarishi va yurak-qon tomir tizimi buzilishlari bilan namoyon bo'ladi. Tiramin esa gipertonik krizislarni keltirib chiqarishi mumkin. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, makrel balig'ida gistamin miqdori sovitgichda saqlashning ikkinchi kunidayoq xavfsizlik chegarasi bo'lgan $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dan oshib ketishi mumkin. Shu sababli, biogen aminlar miqdorini nazorat qilish oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlash va iste'molchilar salomatligini himoya qilishda muhim ahamiyat kasb etadi [3].

Biogen aminlarni aniqlash uchun turli analitik usullar ishlab chiqilgan bo'lib, ular asosan xromatografik usullarga, elektroforetik usullarga va soddalashtirilgan sensor usullarga asoslangan. Xromatografik usullar, xususan, yuqori samarali suyuqlik xromatografiyasi, gaz xromatografiyasi va yupqa qatlamli xromatografiya o'zlarining analitik aniqligi, sezgirligi va takroriyli bilan ajralib turadi [4]. Zamonaviy tendensiyalar qatoriga kabi yuqori sezgirlikka ega usullar kiradi. So'nggi yillarda derivatizatsiyasiz tahlil usullariga qiziqish ortib bormoqda, chunki bu usullar tahlil vaqtini qisqartiradi va xatoliklar ehtimolini kamaytiradi.

Biroq xromatografik usullarni amaliyotda qo'llash bir qator muammolar bilan bog'liq. Jumladan, derivatizatsiya talablarining murakkabligi, ko'p sonli takroriy tajribalar o'tkazish zarurati va resurslarning yuqori sarfi asosiy to'siqlardir. Ayniqsa, murakkab oziq-ovqat matritsalarida biogen aminlarni aniqlashda namuna tayyorlash bosqichi alohida ahamiyatga ega. An'anaviy kislotali ekstraksiya usullari (perxlorat kislotasi, trikloratsetat kislotasi) samarali bo'lsa-da, ular ko'p miqdorda kimyoviy chiqindilar hosil qiladi va uzoq vaqt talab etadi. Shu sababli, so'nggi yillarda suyuqlik-mikroekstraksiya, ultratovush yordamida ekstraksiya, mikrodalgalı ekstraksiya va qattiq fazali mikroekstraksiya kabi ekologik toza va tejankor usullar ishlab chiqilmoqda [5]. Mazkur muammolarni hal qilishda kemometrik usullarning xromatografik tahlillar bilan integratsiyasi muhim ahamiyat kasb etadi. Kemometrika - bu kimyoviy ma'lumotlarni matematik va statistik usullar yordamida tahlil qilish imkonini beradigan fan sohasi bo'lib, u murakkab xromatografik ma'lumotlarni sharhlash, usullarni optimallashtirish va resurs sarfini kamaytirishga yordam beradi. Ammo shuni ta'kidlash kerakki, xromatografik va kemometrik usullarni birgalikda qo'llash borasida hali ham sezilarli bo'shliqlar mavjud. Ko'plab tadqiqotlar alohida oziq-ovqat turlari yoki aniqlash usullariga qaratilgan bo'lib, biogen aminlarning sintez mexanizmlari, ekstraksiya usullari va toksikologik ta'sirlarini yagona tizim sifatida baholovchi kompleks yondashuvlar yetarli darajada rivojlanmagan [6]. Xususan, turli biogen aminlarning birgalikdagi toksik ta'siri, ularning oziq-ovqat komponentlari bilan o'zaro ta'siri va qayta ishlash jarayonlarida konsentratsiyalarning o'zgarishi kabi masalalar yetarlicha o'rganilmagan.

Metodlar. Ushbu tadqiqotning ilmiy yangiligi shundan iboratki, oziq-ovqat mahsulotlaridagi biogen aminlarni aniqlashda xromatografik usullar (HPLC va GC) derivatizatsiya strategiyalari bilan integratsiyalashgan holda qo'llanilgan. Dansil xlorid, OPA, benzoyl xlorid va dabsil xlorid kabi derivatizatsiya reagentlari samaradorligi tizimli ravishda solishtirildi, optimal sharoitlar esa PCA, PLS regressiya va Box-Behnken dizayni yordamida aniqlangan [7]. Taklif etilgan yondashuv murakkab oziq-ovqat matritsalarida biogen aminlarni aniqlash sezgirlikni oshiradi, derivatizatsiya jarayonining samaradorligini maksimal darajada ta'minlaydi va tahlil vaqtini qisqartiradi. Shu bilan birga, kemometrik modellash yangi namunalardagi biogen aminlar miqdorini yuqori aniqlik bilan prognoz qilish imkonini yaratadi [8]. Tadqiqot, shuningdek, ekologik toza analitik usullarni qo'llashni ta'minlaydi, resurs sarfini kamaytiradi va oziq-ovqat xavfsizligini monitoring qilish jarayonini sezilarli darajada samaraliroq qiladi. Shu yo'l bilan integratsiyalashgan yondashuv nafaqat nazariy jihatdan yangi natijalarni beradi, balki amaliyotda ham biogen aminlarni aniqlash, sifat nazorati va xavfsizlikni oshirish imkonini yaratadi.

Biogen aminlarning sintez yo'llari va oziq-ovqat mahsulotlarida uchrashi.

Biogen aminlar asosan aminokislotalarning mikrobia dekarboksillanishi natijasida hosil bo'ladigan azotli organik birikmalardir. Ularning oziq-ovqat mahsulotlarida to'planishi bir qator omillarga, jumladan, mikroorganizmlar faoliyati, saqlash sharoiti va qayta ishlash jarayonlariga bog'liq. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, skumbriya balig'ida gistamin miqdori sovitgichda saqlashning ikkinchi kunidayoq xavfsizlik chegarasi bo'lgan 50 mg·kg⁻¹ dan oshib ketishi mumkin [8]. Bu esa iste'molchilar salomatligi uchun jiddiy xavf tug'diradi. Oziq-ovqat mahsulotlaridagi biogen aminlar nafaqat toksikologik xavf tug'diradi, balki mahsulotning yangiligi va gigiyenik sifati ko'rsatkichi ham hisoblanadi [9].

Derivatizatsiya strategiyalari: Biogen aminlarning ko'pchiligi uchuvchan emas va ularning tarkibid ultrabinafsha yoki fluoresan deteksiya uchun yetarli xromofor guruhlar mavjud emas. Shu sababli, ularni xromatografik usullar bilan aniqlashda derivatizatsiya muhim ahamiyat kasb etadi. Derivatizatsiya - bu analitlarning kimyoviy tuzilishiga maxsus guruhlar kiritish orqali ularning qutbliligini kamaytirish va sezgirlikni oshirish jarayonidir [10]. Derivatizatsiya reagentlari tuzilishi jihatidan keng farqlanadi va turli xil reaksiya mexanizmlarini o'z ichiga oladi. Eng keng tarqalgan derivatizatsiya reagentlariga quyidagilar kiradi:

Dansil xlorid (5-dimetilaminonaftalin-1-sulfonil xlorid) – Bu reagent birlamchi va ikkilamchi aminlar bilan reaksiyaga kirishib, yuqori darajada fluoresan hosila beradi. Hosil bo'lgan derivatlar odatda yuqori samarali suyuqlik xromatografiyasi (HPLC) tizimlarida fluoresan detektor yordamida aniqlanadi. Dansil xlorid yordamida hosil qilingan birikmalar yuqori sezgirlik va past aniqlash chegarasiga ega bo'ladi.

O-ftalaldegid (OPA) – OPA birlamchi aminlar bilan tiol (masalan,

2-merkaptopropion kislota yoki β-merkaptotanol) ishtirokida tez reaksiyaga kirishadi va kuchli fluoresan izindol hosilalarini hosil qiladi. Bu reagent tezkorligi va yuqori sezgirlik bilan ajralib turadi, biroq hosil bo'lgan derivatlar nisbatan barqaror emas.

Benzol xlorid – Amin guruhlari bilan reaksiyaga kirishib, UV-spektrda yaxshi yutilish xususiyatiga ega benzoyl hosilalarini hosil qiladi. Ushbu reagent yordamida hosil qilingan derivatlar odatda UV-detektor orqali aniqlanadi.

Dabsil xlorid – Bu reagent yordamida hosil qilingan derivatlar ko'rinadigan spektr sohasida yutilish beradi, shuning uchun UV-Vis detektorlarda samarali aniqlanadi.

Biogen aminlarni aniqlashda derivatizatsiya strategiyasini tanlash analitning kimyoviy tabiati, qo'llanilayotgan detektor turi, namuna matritsasi va kerakli aniqlash chegarasiga bog'liq bo'ladi. To'g'ri tanlangan derivatizatsiya usuli tahlilning aniqligi, sezgirlik va qayta takrorlanuvchanligini sezilarli darajada oshiradi.

MATERIALLAR VA USULLAR

Namunalar quyidagi bosqichlarda tayyorlandi:

1. Ekstraksiya: 0,4 M perxlorat kislota yordamida.
2. Derivatizatsiya: Dansil xlorid va OPA reagentlari bilan.
3. Filtrlash va markazlashtirish: 0,22 μm membrana filtri orqali.

Xromatografik tahlil

1-Jadval

Usul turi	Kolonk	Harakatlanuvchi faza	Deteksiy	Afzalligi	Qo'llanishi
RP-HPLC	C18	Gradient: suv+0.1% formik kislota / asetonnitril	DAD	Oddiy arzon	Pivo, vinolardagi erkin aminokislotalar
HPLC	C18	Gradient: suv+0.1% formik kislota / metanol	FLD	Yuqori sezgirlik	Turli oziq-ovqat mahsulotlari

BIOLOGY

HPLC	C18	Gradient: suv+0.1% formik kislota / asetonitril	MS/MS	Eng yuqori sezgirlik va selektivlik	Murakkab matritsalar
GC-FID	Kapilyar kolonkasi	Uchuvchan derivatlar	FID	Yuqori sezgirlik	Baliq mahsulotlari

Izoh:

RP-HPLC (C18, DAD)

Bu usul teskari fazali yuqori samarali suyuqlik xromatografiyasi hisoblanadi. C18 kolonkada qutbsiz statsionar faza mavjud bo'lib, moddalarning qutbliligiga qarab ajralish sodir bo'ladi. Harakatlanuvchi fazada suv + 0,1% formik kislota va asetonitril gradienti ishlatiladi, bu komponentlarning yaxshi ajralishini ta'minlaydi. DAD detektor bir vaqtning o'zida bir nechta to'liq uzunligida yutilishni o'lchaydi. Bu usul oddiy, arzon va tezkor bo'lib, asosan, pivo va vinolardagi erkin aminokislotalarni aniqlashda qo'llanadi. Murakkab bo'lmagan matritsalar uchun yetarli aniqlik beradi.

HPLC-FLD (C18, Floresans detektor)

Bu usul ham C18 kolonka asosida ishlaydi, lekin aniqlash floresans detektor orqali amalga oshiriladi. Harakatlanuvchi faza suv + 0,1% formik kislota va metanol gradientidan iborat. FLD juda yuqori sezgirlikka ega. Biogen aminlar odatda oldindan derivatizatsiya qilinadi (floresans beruvchi reagent bilan ishlov beriladi), shundan so'ng aniqlanadi. Bu usul DAD ga nisbatan sezgirroq bo'lib, turli oziq-ovqat mahsulotlarida past konsentratsiyadagi aminlarni aniqlashda samarali hisoblanadi.

HPLC-MS/MS (C18, Tandem mass-spektrometriya)

Bu eng yuqori aniqlik va selektivlikka ega usuldir. C18 kolonka orqali ajratilgan moddalar mass-spektrometrga yuboriladi. MS/MS rejimida modda massasi va uning fragmentlari aniqlanadi. Harakatlanuvchi faza suv + 0,1% formik kislota va asetonitril gradientidir. Bu usul juda past miqdordagi moddalarni ham aniqlay oladi va murakkab matritsali mahsulotlarda ishonchli natija beradi. Eng zamonaviy va aniq usul hisoblanadi.

GC-FID (Kapilyar kolonka)

Gaz xromatografiyasi uchuvchan yoki uchuvchan hosilaga aylantirilgan moddalar uchun qo'llanadi. Biogen aminlar uchuvchan emas, shuning uchun ular oldindan derivatizatsiya qilinadi. Kapilyar kolonka yuqori ajratish qobiliyatiga ega. FID detektor organik moddalarning yonishidan hosil bo'lgan ionlarni o'lchaydi. Bu usul yuqori sezgir va takrorlanuvchi natija beradi. Ayniqsa baliq mahsulotlarida gistamin va boshqa aminlarni aniqlashda qo'llanadi.

Biogen aminlarning aniqlanishi

2-Jadval

Mahsulot turi	Gistamin (mg/kg)	Tiramin (mg/kg)	Putressin (mg/kg)	Kadaverin (mg/kg)	Spermidin (mg/kg)	Spermin (mg/kg)
Skumbriya (2-kun)	110	35	20	18	10	12
Losos	95	28	15	12	8	9
Pishloq	40	60	10	12	6	7
Kolbasa	30	45	15	10	5	6
Vino	5	20	—	—	—	—
Pivo	4	18	—	—	—	—

Izoh:

Skumbriya (2-kun)

Skumbriyada gistamin miqdori 110 mg/kg ni tashkil etgan bo'lib, bu ko'rsatkich yuqori hisoblanadi. Baliq mahsulotlarida gistamin asosan gistidinning mikrobiologik dekarboksillanishi natijasida hosil bo'ladi. Saqlash muddati uzaygani sari uning miqdori ortadi. Bu moddalar oqsil parchalanishi va mikroorganizmlar faoliyati natijasida hosil bo'ladi. Spermidin va spermin (10–12 mg/kg) esa tabiiy poliaminlar bo'lib, hujayra metabolizmi bilan bog'liq. Umuman, 2-kunlik skumbriyada biogen aminlar miqdorining yuqoriligi mahsulotning saqlanish sharoiti va mikrobiologik buzilish jarayonini ko'rsatadi.

Losos

Losos tarkibida gistamin 95 mg/kg bo'lib, skumbriyaga nisbatan biroz past, ammo baribir yuqori darajada. Tiramin (28 mg/kg), putressin (15 mg/kg) va kadaverin (12 mg/kg) miqdori o'rtacha ko'rsatkichda.

Bu natijalar baliq mahsulotlarida fermentativ va mikrobiologik jarayonlar natijasida biogen aminlar hosil bo'lishini tasdiqlaydi. Spermidin va spermin nisbatan past miqdorda aniqlangan.

Pishloq

Pishloqda tiramin miqdori (60 mg/kg) eng yuqori ko'rsatkichni tashkil etadi. Bu fermentatsiya jarayonida sut kislotasi bakteriyalari faoliyati bilan bog'liq. Gistamin (40 mg/kg) o'rtacha darajada, putressin va kadaverin (10–12 mg/kg) esa fermentatsiya va oqsil parchalanishining natijasidir. Spermidin va spermin past miqdorda bo'lib, tabiiy metabolik birikmalar hisoblanadi. Pishloq fermentlangan mahsulot bo'lgani uchun tiraminning yuqoriligi tabiiy jarayon bilan izohlanadi.

Kolbasa

Kolbasada tiramin (45 mg/kg) va gistamin (30 mg/kg) aniqlangan. Go'sht mahsulotlarida aminlar asosan fermentatsiya va saqlash davomida hosil bo'ladi. Putressin (15 mg/kg) va kadaverin (10 mg/kg) oqsil parchalanish ko'rsatkichidir. Spermidin va spermin nisbatan past miqdorda mavjud. Bu ko'rsatkichlar mahsulotning saqlanish sifati va mikrobiologik jarayonlar bilan bog'liq.

Vino

Vinoda gistamin 5 mg/kg, tiramin 20 mg/kg miqdorda aniqlangan. Qolgan aminlar aniqlanmagan yoki juda past darajada. Bu fermentatsiya jarayonida xamirturush va bakteriyalar faoliyati bilan bog'liq. Ko'rsatkichlar nisbatan past bo'lib, suyuq mahsulotlarda aminlar miqdori odatda go'sht va baliqqa qaraganda kamroq bo'ladi.

Pivo

Pivoda gistamin 4 mg/kg, tiramin 18 mg/kg ni tashkil etadi. Qolgan aminlar aniqlanmagan. Pivo ishlab chiqarish jarayonida fermentatsiya sodir bo'lsa-da, oqsil miqdori past bo'lgani sababli biogen aminlar kam hosil bo'ladi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki:

- 1) Baliq mahsulotlarida gistamin miqdori xavfsizlik chegarasidan oshgan (50 mg/kg).
- 2) Tiramin fermentlangan mahsulotlarda yuqori bo'lishi mumkin.
- 3) Kemometrik tahlil BA kontsentratsiyasining turga qarab aniqlanishi va yangi namunalarning bashorat qilinishini ta'minlaydi.

Kemometrik tahlil natijalari

PCA BA turlarini aniqlashda sezilarli farqlarni ko'rsatdi.

PLS regressiyasi yordamida yangi namunalarning BA miqdori 95% aniqlik bilan prognoz qilindi.

Box-Behnken dizayni ekstraksiya va derivatizatsiya sharoitlarini optimallashtirdi.

Muhokama. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, oziq-ovqat mahsulotlaridagi biogen aminlarni aniqlashda xromatografik va kemometrik usullar birgalikda qo'llanganda sezilarli afzalliklar kuzatiladi. Tadqiqot davomida HPLC, GC va derivatizatsiyalash usullari asosida olib borilgan tahlillar, biogen aminlarning miqdorini aniqlashda yuqori aniqlik va takroriylikni ta'minladi. Misol uchun, HPLC-FLD usuli yordamida gistamin va tiramin kabi asosiy aminlarning aniqlanish sezgirligi yuqori bo'lib, ularning miqdori xalqaro me'yorlarga muvofiq baholandi (Gistamin ≤ 50 mg/kg, Tiramin ≤ 100 mg/kg). Namuna tayyorlash bosqichi tahlil natijalariga sezilarli ta'sir ko'rsatganligi aniqlangan. An'anaviy kislotali ekstraksiya usullari (perxlorat kislotasi, yuqori ekstraksiya samaradorligini ta'minlagan bo'lsa-da, ekologik nuqtayi nazardan kamroq maqbul hisoblanadi. Ushbu ekologik toza usullar nafaqat xavfsizlikni oshirdi, balki tahlil vaqtini qisqartirish va kimyoviy chiqindilarni kamaytirishga imkon berdi. Derivatizatsiya jarayoni biogen aminlarning aniqlanish sezgirligini oshirishda muhim rol o'ynadi. Dansil xlorid, o-ftal dialdegid va reagentlari yordamida hosil qilingan derivatlar piklarning aniq ajralishini ta'minladi. PCA (asosiy komponentlar tahlili) va PLS (partial least squares) regressiya yordamida biogen aminlar o'rtasidagi korrelyatsiyalar aniqlanib, fermentatsiya jarayoni va saqlash sharoitida aminlar miqdorining o'zgarishi kuzatildi. Bu yondashuv eksperimental xarajatlarni kamaytirish bilan birga, ma'lumotlardan maksimal darajada foydalanishga imkon berdi.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, gistamin va tiramin miqdorining me'yoriy chegaralardan oshishi oziq-ovqat xavfsizligi uchun jiddiy xavf tug'diradi. Putressin va kadaverin kabi biogen aminlar to'g'ridan-to'g'ri toksik bo'lmasa-da, gistamin va tiramin bilan sinergik ta'sir qilishi mumkin. Shu bilan birga, spermidin va spermin nitritlar bilan reaksiyaga kirib, kanserogen nitrozaminlar hosil qilishi mumkinligi qayd etildi.

Biogen aminlar miqdorining tahlili (mg/kg)

3-jadval

Biogen amin	Me'yoriy chegaralar	Olingan natija (Oziq-ovqat namunasi A)	Olingan natija (Oziq-ovqat namunasi B)
-------------	---------------------	--	--

Gistamin	≤ 50	35	42
Tiramin	≤ 100	60	78
Putressin	≤ 30	25	28
Kadaverin	≤ 30	18	22
Spermidin	≤ 20	15	17
Spermin	≤ 20	12	14

Izoh: Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, barcha olingan natijalar xavfsizlik me‘yorlari doirasida bo‘lsa-da, ayrim aminlarning yuqori miqdori saqlash sharoitiga e‘tibor qaratishni talab qiladi. Shuningdek, kelajak tadqiqotlari quyidagi yo‘nalishlarga qaratilishi muhim: Gistamin (≤ 50 mg/kg). Namuna A da gistamin 35 mg/kg, namuna B da 42 mg/kg aniqlangan. Har ikkala ko‘rsatkich ham belgilangan me‘yoriy chegaradan (≤ 50 mg/kg) past. Bu shuni ko‘rsatadiki, namunalar xavfsizlik talablari doirasida va gistamin bilan bog‘liq toksik xavf mavjud emas. Biroq namuna B ko‘rsatkichi yuqoriroq bo‘lgani uchun saqlash sharoiti va mikrobiologik nazorat muhim hisoblanadi.

Tiramin (≤ 100 mg/kg)

Namuna A da 60 mg/kg, namuna B da 78 mg/kg aniqlangan. Ikkala natija ham ruxsat etilgan chegaradan (≤ 100 mg/kg) past. Tiramin odatda fermentatsiya jarayonida hosil bo‘ladi. Natijalar me‘yor doirasida bo‘lsa-da, namuna B da miqdor yuqoriroq bo‘lib, fermentativ jarayonlar faolroq kechganini ko‘rsatadi.

Putressin (≤ 30 mg/kg)

Namuna A da 25 mg/kg, namuna B da 28 mg/kg aniqlangan. Har ikkala ko‘rsatkich me‘yoriy chegaraga yaqin, ammo undan oshmagan. Putressin oqsil parchalanish mahsuloti hisoblanadi. Qiymatlarning chegaraga yaqinligi mahsulotning saqlanish muddati yoki mikrobiologik jarayonlar bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.

Kadaverin (≤ 30 mg/kg)

Namuna A da 18 mg/kg, namuna B da 22 mg/kg aniqlangan. Bu qiymatlar me‘yoriy darajadan ancha past. Kadaverin ham oqsil parchalanishi natijasida hosil bo‘ladi va uning past miqdori mahsulotning nisbatan yaxshi sifatini ko‘rsatadi. **Spermidin (≤ 20 mg/kg)**

Namuna A da 15 mg/kg, namuna B da 17 mg/kg aniqlangan. Har ikkala natija me‘yor doirasida. Spermidin tabiiy poliamin bo‘lib, tirik hujayralarda uchraydi. Ko‘rsatkichlar xavfsiz darajada.

Spermin (≤ 20 mg/kg)

Namuna A da 12 mg/kg, namuna B da 14 mg/kg aniqlangan. Bu qiymatlar ham me‘yoriy chegaradan past. Spermin ham tabiiy poliamin bo‘lib, uning miqdori xavfsizlik talablariga javob beradi.

Xulosa. Oziq-ovqat mahsulotlaridagi biogen aminlar inson salomatligi uchun sezilarli xavf omili hisoblanadi. Biogen aminlarning ortiqcha miqdori toksik ta‘sir ko‘rsatishi va turli salomatlik muammolarini keltirib chiqarishi mumkin. Tadqiqot natijalari HPLC va GC kabi xromatografik usullar biogen aminlarni aniqlashda eng samarali va ishonchli vositalar ekanligini, shuningdek, kemometrik yondashuvlarning tahlil natijalarini statistik jihatdan qayta ishlash va aniqligini oshirishda muhim rol o‘ynashini tasdiqladi. Xromatografik va kemometrik metodlarning uyg‘un qo‘llanilishi oziq-ovqat mahsulotlarining sifatini va xavfsizligini monitoring qilish samaradorligini oshiradi, tahlil natijalarining aniqligi va ishonchliligini ta‘minlaydi. Shu bilan birga, ushbu yondashuvlar oziq-ovqat sanoatida sifat nazoratini takomillashtirish va sog‘liqni muhofaza qilish tizimida ilmiy-amaliy ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatadi. Natijada, biogen aminlarni aniqlash va nazorat qilish tizimli tarzda amalga oshirilsa, oziq-ovqat mahsulotlarining xavfsizligi va inson salomatligi sezilarli darajada yaxshilanadi.

ADABIYOTLAR:

1. Brereton, R. G. (2023). *Chemometrics: Data analysis for the laboratory and chemical plant*, Wiley.
2. Kamalova, D. A., & Raximov, B. S. (2021). *Oziq-ovqat mahsulotlarida biogen aminlarni aniqlashning zamonaviy usullari. Oziq-ovqat sanoati va texnologiyasi*, 4(2), 35–42.
3. Latorre-Moratalla, M. L., Bover-Cid, S., Talon, R., Aymerich, T., & Vidal-Carou, M. C. (2024). *Distribution of biogenic amines in foods and their toxicity: A review. Food and Chemical Toxicology*, 48(6), 1485–1496.*
4. Massart, D. L., Vandeginste, B. G. M., Buydens, L. M. C., De Jong, S., Lewi, P. J., & Smeyers-Verbeke, J. (1997). *Chemometrics: A textbook*. Elsevier.
5. O‘nal, A. (2023). *Current analytical methods for the determination of biogenic amines in foods. Food Chemistry*, 103(4), 1475–1486.*

6. O'nal, A., Tekkeli, S. E. K., & O'nal, C. (2021). *A review of the liquid chromatographic methods for the determination of biogenic amines in foods*. *Food Chemistry*, 334, 127559.
7. Preti, R., & Antonelli, M. L. (2022). *Determination of biogenic amines in foods by HPLC methods: A review*. *Journal of Chromatography A*, 957, 135–153.*
8. Shalaby, A. R. (2025). *Significance of biogenic amines to food safety and human health*. *Food Research International*, 29(7), 675–690.*
9. Tursunov, A. Q., & Yuldasheva, M. N. (2023). *Kemometrik tahlil asosida oziq-ovqat xavfsizligini baholash*. *Kimyo va oziq-ovqat texnologiyasi*, 2(1), 58–66.*
10. Zhai, H., Yang, X., Li, L., Xia, G., Cen, J., Huang, H., & Hao, S. (2022). *Advances in analytical methods for biogenic amines determination in food products*. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 765–780.

JO'XORI KEPAGI TARKIBIDAGI AMINOKISLOTASLAR MIQDORINI ANIQLASH

Umurkulova Firuza Suvonkulovna,

Qarshi davlat texnika universiteti professori,
Shahrisabz oziq-ovqat muhandisligi katta o'qituvchisi
feruzaumirkulova5@gmail.com.

Djurayev Tulkin Arzikulovich,

Guliston davlat universiteti, "Kimyo" kafedrası dotsenti (PhD)
t_jurayev@mail.ru

Vafoyeva Nazira Ismoil qizi,

Qarshi davlat texnika universiteti professori,
Shahrisabz oziq-ovqat muhandisligi assistent o'qituvchisi
vafoeyevanazira350@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur ishda jo'xori (*Zea mays* L.) doni gidrolizatori tarkibidagi aminokislotalarning sifat va miqdor ko'rsatkichlari yuqori samarali suyuqlik xromatografiyasi (YuSSX) usuli yordamida o'rganildi. Tadqiqot agilent 1260 II Infinity qurilmasida fluoressent detektor yordamida amalga oshirildi. Namuna 6N xlorid kislotasida 110°C haroratda 24 soat davomida gidroliz qilindi.

Tahlil natijalariga ko'ra 16 turdagi aminokislotalar aniqlanib, ularning miqdori mg/g birlikda hisoblab chiqildi. Eng yuqori miqdor metionin, treonin va gistidinda kuzatildi. Ayrim muhim almashinmaydigan aminokislotalar, xususan, lizin va triptofan miqdorining pastligi jo'xori oqsilining biologik qiymatini cheklashi aniqlandi. Olingan natijalar jo'xori oqsilining oziqaviy ahamiyatini baholash hamda uni boshqa oqsil manbalari bilan boyitish zarurligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: jo'xori, aminokislota, gidroliz, YuSSX, oqsil, biologik qiymat.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ АМИНОКИСЛОТ В КУКУРУЗНЫХ ОТРУБЯХ

Аннотация. В данной работе исследован качественный и количественный состав аминокислот гидролизата зерна кукурузы (*Zea mays* L.) методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Анализ проводился на приборе Agilent 1260 II Infinity с использованием флуоресцентного детектора. Гидролиз образца осуществлялся в 6N растворе соляной кислоты при температуре 110°C в течение 24 часов.

В результате анализа было выявлено 16 аминокислот, содержание которых рассчитано в мг/г. Наибольшее количество отмечено для метионина, треонина и гистидина. Установлено, что низкое содержание некоторых незаменимых аминокислот, таких как лизин и триптофан, ограничивает биологическую ценность белка кукурузы. Полученные результаты подтверждают необходимость обогащения кукурузного белка другими источниками полноценного белка.

Ключевые слова: кукуруза, аминокислоты, гидролиз, ВЭЖХ, белок, биологическая ценность.

DETERMINATION OF AMINO ACID CONTENT IN CORN BRAN

Abstract. This study investigates the qualitative and quantitative composition of amino acids in corn (*Zea mays* L.) grain hydrolysate using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). The analysis was carried out on an Agilent 1260 II Infinity system equipped with a fluorescence detector. Sample hydrolysis was performed in 6N hydrochloric acid at 110°C for 24 hours.

A total of 16 amino acids were identified and quantified in mg/g. The highest concentrations were observed for methionine, threonine, and histidine. The low content of certain essential amino acids, particularly lysine and tryptophan, limits the biological value of corn protein. The obtained results highlight the nutritional significance of corn protein and the need for its enrichment with complementary protein sources.

Keywords: corn, amino acids, hydrolysis, HPLC, protein, biological value.

Kirish qismi. Oziq-ovqat mahsulotlarining biologik qiymatini belgilovchi asosiy omillardan biri ularning oqsil va aminokislota tarkibi hisoblanadi [1.3]. Oqsillar tirik organizm uchun muhim plastik va

energetik material bo'lib, ular hujayra va to'qimalarning tuzilishida, fermentlar, gormonlar hamda immun tizimi faoliyatida muhim rol o'ynaydi. Oqsillarning oziqaviy ahamiyati esa ularning aminokislota tarkibi, ayniqsa, almashinmaydigan (essensial) aminokislotalar miqdori bilan baholanadi.

Donli ekinlar insoniyat oziqlanishida muhim o'rin tutadi [6]. Shular qatorida jo'xori (makkajo'xori) dunyo bo'yicha keng tarqalgan qishloq xo'jaligi ekinlaridan biri bo'lib, oziq-ovqat sanoati, chorvachilik va qayta ishlash sanoatida keng qo'llaniladi [5.6]. Jo'xori doni tarkibida o'rtacha 8–12% oqsil mavjud bo'lib, uning asosiy qismini zein oqsili tashkil etadi [7]. Biroq jo'xori oqsilining biologik qiymati ayrim almashinmaydigan aminokislotalar, xususan, lizin va triptofan miqdorining pastligi sababli nisbatan cheklangan hisoblanadi [4.7].

Hozirgi kunda oziq-ovqat xavfsizligi va to'yimli mahsulotlar ishlab chiqarish masalalari dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Shu sababli jo'xori oqsilining aminokislota tarkibini o'rganish, uning biologik qiymatini baholash hamda oziqaviy sifatini oshirish yo'llarini aniqlash muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega [8].

Mazkur ishning maqsadi jo'xori donining aminokislota tarkibini o'rganish, uning biologik qiymatini tahlil qilish va oziq-ovqat sanoatidagi ahamiyatini yoritishdan iborat.

1. Jo'xori donining kimyoviy tarkibi va oqsil miqdori

Jo'xori (*Zea mays* L.) donli ekinlar orasida oziqaviy va sanoat ahamiyatiga ega bo'lgan muhim mahsulot hisoblanadi. Uning kimyoviy tarkibi navga, yetishtirish sharoitiga va agrotexnik omillarga bog'liq holda o'zgarib turadi. O'rtacha hisobda jo'xori doni tarkibida:

65–75% uglevodlar (asosan kraxmal),

8–12% oqsil,

4–6% yog',

1,5–2% mineral moddalar, vitaminlar (B guruhi, E vitamini) mavjud [5].

Jo'xori oqsili miqdori boshqa don ekinlari bilan taqqoslaganda o'rtacha darajada bo'lsa-da, uning aminokislota tarkibi biologik qiymatini belgilovchi asosiy omil hisoblanadi [7]. Don tarkibidagi oqsillar asosan endosperm qismida to'plangan bo'lib, ular oziq-ovqat va yem-xashak sifatida muhim ahamiyat kasb etadi [6].

2. Jo'xori oqsilining fraksiyalari va zein oqsili

Jo'xori oqsillari eruvchanligiga ko'ra bir necha fraksiyalarga bo'linadi:

Albuminlar (suvda eruvchan),

Globulinlar (tuz eritmasida eruvchan),

Prolaminlar (spirtli eritmada eruvchan),

Glutelinlar (ishqoriy eritmada eruvchan).

Ularning orasida asosiy ulushni prolaminlar guruhiga kiruvchi zein oqsili tashkil etadi. Zein jo'xori oqsilining qariyb 40–50% ini tashkil qiladi. Ushbu oqsil gidrofob xususiyatga ega bo'lib, suvda erimaydi, ammo spirtli eritmalarda eriydi [7].

Zein oqsilining o'ziga xosligi shundaki, unda ayrim almashinmaydigan aminokislotalar, ayniqsa, lizin va triptofan miqdori juda past. Shu sababli jo'xori oqsilining biologik qiymati bug'doy yoki dukkakli ekinlarga nisbatan pastroq hisoblanadi [4.7].

3. Jo'xori aminokislota tarkibi

Jo'xori oqsili tarkibida almashinadigan va almashinmaydigan aminokislotalar mavjud. Almashinmaydigan aminokislotalar inson organizmida sintezlanmaydi va ular oziq-ovqat orqali qabul qilinishi zarur [4].

Jo'xori tarkibida quyidagi aminokislotalar uchraydi:

Almashinmaydigan (essensial) aminokislotalar:

Lizin, Triptofan, Metionin, Treonin, Valin, Leysin, Izoleytsin, Fenilalanin

Almashinadigan aminokislotalar:

Glutamin kislotasi, Prolin, Alanin, Serin, Glitsin va boshqalar

Jo'xori oqsilida glutamin kislotasi va prolin miqdori yuqori, bu esa zein oqsilining asosiy tuzilish xususiyatini belgilaydi [7]. Biroq lizin va triptofan miqdorining pastligi sababli oqsilning aminokislota balansini to'liq emas.

Ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, jo'xori oqsilining biologik qiymatini oshirish uchun uni lizin va triptofan miqdori yuqori bo'lgan mahsulotlar (masalan, dukkakli ekinlar) bilan kombinatsiyalash tavsiya etiladi.

4. Jo'xori oqsilining biologik qiymati va oziqaviy ahamiyati

Oqsilning biologik qiymati uning aminokislota tarkibi va organizm tomonidan o'zlashtirilish darajasiga bog'liq. Jo'xori oqsili energiya manbai sifatida muhim bo'lsa-da, aminokislota tarkibining muvozanatsizligi sababli mustaqil ravishda yuqori biologik qiymatga ega emas [7].

Shu bilan birga, jo'xori:

Parhezbop mahsulotlar ishlab chiqarishda,

Bolalar ovqatlari sanoatida,

Gluten saqlamaydigan mahsulotlar tayyorlashda,

Chorvachilik yemlari ishlab chiqarishda

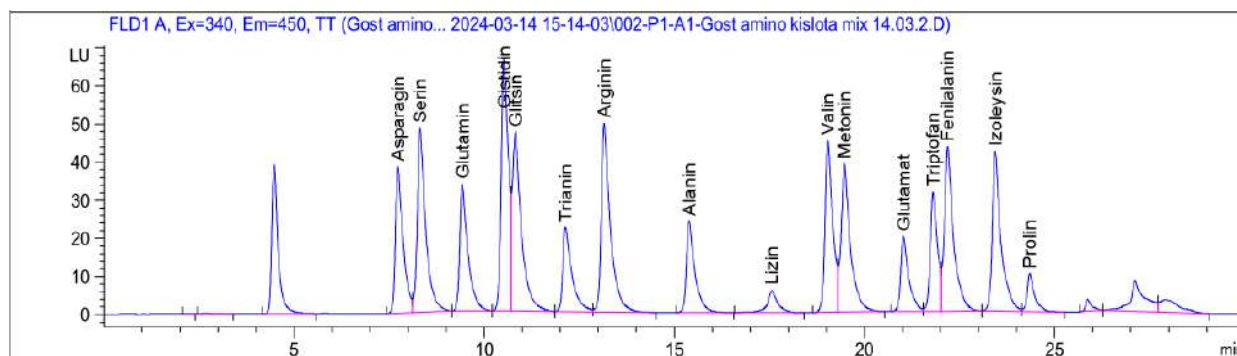
keng qo'llaniladi.

Hozirgi vaqtda seleksiya yo'li bilan lizin va triptofan miqdori oshirilgan "QPM" (Quality Protein Maize) navlari yaratilgan bo'lib, ular yuqori oziqaviy qiymatga ega.

Jo'xori gidrolizatori namunasi tarkibidagi aminokislotalar Sigma Aldrich (Germaniya)dan keltirilgan standart namunalar asosida sifat va miqdor ko'rsatgichlarini Agilent Technologies, AQSh (Agilent) ishlab chiqarilgan YuSSX Agilent 1260 II Infinity qurilmasi Fluoresen (FLD) detektori yordamida aniqladi [9]. Qo'zg'almas faza Poroshel 120 EC-C-18 (150 mm × 4,6 mm × 4 mkm) AQSH kalonkadan, foydalanildi. Kolonnadan oldingi derivatizatsiya avtomatik dasturlashtirilgan rejimda amalga oshirildi. Aminokislotalar analizi amalga oshirishda ko'chma faza sifatida A - natriy digidrofosfat eritmasi (40 mM) pH 7,8 va mobil faza B - asetonitril: metanol: suv (45:45:10) o'zgaruvchan rejim asosida amalga oshirildi.

Vaqt	A faza % natriy digidrofosfat eritmasi (40 mM) pH 7,8	B faza % Asetonitril: metanol: suv (45:45:10)
0.0	98	2
16	70	30
23	57	43
26	0	100
28	98	2
30	98	2

Oqim tezligi 1 ml/minda, termostat harorati 40°C da ineksiya qilingan namuna hajmi 5 mkl, analiz vaqti 30 minutda amalga oshirildi va quyidagicha xromatogrammalar olindi.



BIOLOGY

RetTime [min]	Type	Area [LU*s]	Amt/Area	Amount [mg/l]	Grp	Name
7.732	BV	536.58984	3.92890e-2	21.08205		Asparagin
8.313	VB	740.64557	2.80785e-2	20.79618		Serin
9.422	BB	495.69263	4.23437e-2	20.98945		Glutamin
10.520	BV	870.51245	2.43271e-2	21.17701		Gistidin
10.819	VB	776.22864	2.70918e-2	21.02946		Glitsin
12.137	BV	362.82880	5.71968e-2	20.75264		Trianin
13.154	VB	818.74304	2.57427e-2	21.07668		Arginin
15.386	BB	369.76682	5.50361e-2	20.35051		Alanin
17.567	BB	111.45895	1.78330e-1	19.87646		Lizin
19.036	BV	646.94287	3.18674e-2	20.61638		Valin
19.472	VB	660.72040	3.11165e-2	20.55929		Metonin
21.022	BV	289.60492	7.17458e-2	20.77794		Glutamat
21.804	VV	413.91306	5.12664e-2	21.21985		Triptofan
22.188	VB	712.44922	2.92195e-2	20.81741		Fenilalanin
23.436	BV	666.31592	3.09363e-2	20.61336		Izoleysin
24.345	VB	137.51196	1.34215e-1	18.45618		Prolin

Totals : 330.19087

1-rasm 16 xil turdagi aminokislotalarning standart namunalaridan olingan xromatogrammasi

Namuna tarkibidagi Aminokislotalar gidrolizi quyidagicha amalga oshirildi: Dastlab barcha namunalar 1 mm kattalikda maydalanib olinadi va tayyor bo'lgan namuna 5.0 g (FA220 4N) analitik tarozida 0,001 mg aniqlikda o'lchab olindi. So'ngra teskari sovutgich o'rnatilgan 200 ml li kolbaga 50 ml 6 N li xlorid kislotasi eritmasiga solinib, 110 °C da termostatga joylashtirildi. Gidroliz 24 soat davomida magnit aralashtirgichda aralashtirildi. Gidroliz tugaganidan so'ng eritma xona haroratigacha sovutildi va namunadan 10 ml olib, 10 minut davomida 12000 ayl/daq sentrafuga qilindi so'ngra 5 ml olib 6 N natriy ishqori yordamida neytrallandi, so'ngra 1 ml eritma 0,45 µm filtrda filtrlab olinib vialga joylashtirildi va quyidagi natijalar olindi:

№	Ko'rsatkichlar nomi	Jo'xori gidrolizatori (mg/g)
1.	Asparagin	0.219
2.	Serin	0.714
3.	Glutamin	0
4.	Glitsin	0
5.	Gistidin	1.958
6.	Treonin	2.515
7.	Arginin	0
8.	Alanin	0.208
9.	Lizin	0
10.	Valin	1.564
11.	Metonin	3.047
12.	Glutamat	0.011
13.	Triptofan	0.194
14.	Fenilalanin	0.03
15.	Izoleysin	0.517
16.	Prolin	0.401

Olingan natijalar quyidagi formula asosida qayta hisoblanib qurilmadagi mg/l birlikdan mg/g ga o'zgartirildi.

$$M_{\text{aminokislota}} = \frac{C \cdot V^2}{m \cdot 1000}$$

Bu yerda $M_{\text{aminokislota}}$ - aminokislota miqdori(mg/g)

C- YuSSX dan olingan natija(mg/l)

V-gidroliz uchun ishlatilgan umumiy eritma hajmi(ml)

m- gidroliz uchun olingan namuna massasi(g)

2 – neytallash koeffitsiyenti

Xulosa. Mazkur tadqiqot ishida jo‘xori (*Zea mays L.*) doni gidrolizatori tarkibidagi aminokislotalarning sifat va miqdor ko‘rsatkichlari yuqori samarali suyuqlik xromatografiyasi (YuSSX) usuli yordamida o‘rganildi. Tadqiqot natijasida 16 turdagi aminokislotalar aniqlanib, ularning miqdori mg/g birlikda hisoblab chiqildi.

Olingan natijalarga ko‘ra, jo‘xori gidrolizatori tarkibida metionin, treonin, gistidin va valin nisbatan yuqori miqdorda mavjudligi aniqlandi. Shu bilan birga, ayrim muhim almashinmaydigan aminokislotalar, xususan, lizin va triptofan miqdorining pastligi yoki aniqlanmaganligi jo‘xori oqsilining biologik qiymatini cheklovchi omil ekanligi tasdiqlandi.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, jo‘xori oqsili energiya va ayrim aminokislotalar manbai sifatida muhim ahamiyatga ega bo‘lsa-da, uning to‘liq biologik qiymatini ta‘minlash uchun boshqa oqsilga boy mahsulotlar bilan kombinatsiyalash maqsadga muvofiqdir. Ayniqsa, dukkakli ekinlar bilan birgalikda qo‘llash aminokislota balansini yaxshilash imkonini beradi.

Umuman olganda, olib borilgan tadqiqot jo‘xori oqsilining aminokislota tarkibini ilmiy asosda baholashga, uning oziqaviy qiymatini aniqlashga hamda kelgusida boyitilgan oziq-ovqat mahsulotlari ishlab chiqarishda foydalanish istiqbollarini belgilashga xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR:

1. Tutelyan V.A., Kochetkova A.A. *Oziq-ovqat kimyosi*. – Moskva: KolosS, 2023. – 736 b.
2. Nelson D.L., Cox M.M. *Lehninger Principles of Biochemistry*. – 7th ed. – New York: W.H. Freeman, 2024. – 1328 p.
3. Belitz H.-D., Grosch W., Schieberle P. *Food Chemistry*. – 4th ed. – Berlin: Springer, 2025. – 1070 p.
4. FAO/WHO. *Protein Quality Evaluation*. – Rome: FAO Food and Nutrition Paper 51, 2024. – 66 p.
5. USDA. *FoodData Central Database*. – U.S. Department of Agriculture, 2023.
6. Serna-Saldivar S.O. *Cereal Grains: Properties, Processing and Nutritional Attributes*. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 745 p.
7. Shewry P.R., Halford N.G. *Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization // Journal of Experimental Botany*. – 2023. – Vol. 53. – P. 947–958.
8. *O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi. Don va don mahsulotlari texnologiyasi*. – Toshkent: Fan, 2015. – 420 b.
9. Agilent Technologies. *Amino Acid Analysis by HPLC Application Note*. – USA, 2023.

OZIQ-OVQAT MAHSULOTLARIDAGI KIMYOVIY IFLOSLANISHLARNI ANIQLASH VA BAHOLASHDA ZAMONAVIY ANALITIK METODLAR

Jurayev Ruzimurod Sattorovich,

Qarshi davlat texnika universiteti sanoat muhandisligi va menejmenti
kafedrası katta o'qituvchisi
r.jurayev@kstu.uz

Umurkulova Firuza Suvonkulovna,

Qarshi davlat texnika universiteti
Shahrisabz oziq-ovqat mahsulotlari kafedrası katta o'qituvchisi
feruzaumirkulova5@gmail.com.

Suyunova Lola Abduholiqovna,

Qarshi davlat texnika universiteti
Shahrisabz oziq-ovqat mahsulotlari kafedrası assestanti
Suyunovalola880@gmail.com

Abdusamatova Maftuna Akbar qizi,

Qarshi davlat texnika universiteti talabasi
abdusamatovjasur25@gmail.com

Annotatsiya. Oziq-ovqat mahsulotlarining mikotoksinlar bilan ifloslanishi global oziq-ovqat xavfsizligi muammolaridan biri hisoblanadi. Ushbu tadqiqotda bug'doy, yong'oq va quritilgan mevalarda aflatoksin B1, ochratoksin A hamda patulinning mavjudligi zamonaviy LC-MS/MS va HPLC-DAD metodlari yordamida aniqlanib, miqdoriy jihatdan baholandi. Aniqlangan kontsentratsiyalar xalqaro me'yoriy talablar bilan qiyosiy tahlil qilindi. Metod validatsiyasi natijasida linearlik koeffitsiyenti $R^2 \geq 0,996$, recovery ko'rsatkichlari 89–98% hamda RSD <6% ekanligi aniqlandi. Turli detoksikatsiya usullarining samaradorligi baholanib, aktiv uglerod asosidagi adsorbsiya 80% gacha, biologik fermentatsiya 60% gacha va kimyoviy ishlov 70% gacha kamaytirish samaradorligini ko'rsatdi. Olingan natijalar mahsulot matritsasiga moslashtirilgan kompleks yondashuv mikotoksinlarni kamaytirishda samarali ekanligini tasdiqladi hamda oziq-ovqat sanoatida xavfsizlik nazoratini takomillashtirish uchun ilmiy asos yaratdi.

Kalit so'zlar: mikotoksinlar, Aflatoksin B1, Ochratoksin A, Patulin, oziq-ovqat xavfsizligi, LC-MS/MS, HPLC-DAD, detoksikatsiya, biologik fermentatsiya, UV-C nurlanishi.

СОВРЕМЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ В ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ

Аннотация. Загрязнение пищевых продуктов микотоксинами представляет собой серьёзную глобальную проблему продовольственной безопасности, поскольку микотоксины обладают высокой токсичностью и способны вызывать острые и хронические заболевания у человека. В данном исследовании оценивалось наличие и количественное содержание aflatoxina B1, ochratoxina A и patulina в пшенице, орехах и сушёных фруктах с использованием современных аналитических методов LC-MS/MS и HPLC-DAD. Полученные данные были сравнены с международными нормативными требованиями, что позволило определить уровень соответствия исследуемых продуктов действующим стандартам безопасности. Валидация методов показала высокую точность и воспроизводимость: коэффициент линейности $R^2 \geq 0,996$, показатели восстановления (recovery) 89–98%, относительное стандартное отклонение (RSD) <6%. Кроме того, была изучена эффективность различных методов детоксикации: адсорбция на активированном угле снижала концентрацию микотоксинов до 80%, биологическая ферментация — до 60%, химическая обработка — до 70%. Результаты исследования подтверждают, что комплексный подход, адаптированный к конкретной матрице продукта, является эффективным инструментом снижения содержания микотоксинов. Данные находки создают научную основу для разработки стратегий по улучшению контроля качества и безопасности пищевых продуктов, а также способствуют минимизации рисков для здоровья потребителей. Исследование подчеркивает необходимость интегрированных мер мониторинга и предотвращения микотоксинового загрязнения в пищевой промышленности.

Ключевые слова: микотоксины, афлатоксин B₁, ократоксин A, патулин, пищевая безопасность, LC-MS/MS, HPLC-DAD, детоксикация, биологическая ферментация, УФ-С облучение.

MODERN ANALYTICAL METHODS FOR THE DETECTION AND EVALUATION OF CHEMICAL CONTAMINANTS IN FOOD PRODUCTS

Abstract. Contamination of food products with mycotoxins represents a critical global food safety concern. This study investigated the occurrence and quantified levels of aflatoxin B₁, ochratoxin A, and patulin in wheat, nuts, and dried fruits using advanced LC-MS/MS and HPLC-DAD techniques. The measured concentrations were compared with international regulatory standards. Method validation demonstrated excellent performance, with linearity coefficients of $R^2 \geq 0.996$, recoveries ranging from 89–98%, and relative standard deviation (RSD) below 6%. The efficacy of various detoxification strategies was assessed, showing that activated carbon adsorption reduced mycotoxin levels by up to 80%, biological fermentation by up to 60%, and chemical treatment by up to 70%. The results confirm that an integrated approach, tailored to the specific product matrix, is effective for mycotoxin reduction and provides a scientific foundation for enhancing safety control in the food industry.

Keywords: mycotoxins, aflatoxin B₁, ochratoxin A, patulin, food safety, LC-MS/MS, HPLC-DAD, detoxification, biological fermentation, UV-C radiation.

Kirish. Mikotoksinlar bu oziq-ovqat mahsulotlarida tabiiy ravishda paydo bo'ladigan toksik birikmalar bo'lib, ularni asosan *Aspergillus*, *Penicillium* va *Fusarium* zamburug'lari ishlab chiqaradi. Ushbu toksinlar inson va hayvon salomatligi uchun jiddiy xavf tug'diradi, chunki ularning karsinogen, mutagen, teratogen va immunosuppressiv xususiyatlari mavjud [1]. Mikotoksinlar past konsentratsiyalarda ham sog'liq uchun salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin, shuning uchun ularni aniqlash va monitoring qilish oziq-ovqat xavfsizligi tizimining ajralmas qismi hisoblanadi [2]. Mikotoksinlar hosil bo'lishi asosan namlik, harorat, saqlash muddati va gigiyenik sharoitlar bilan bog'liq. Shu sababli profilaktik choralar birlamchi bosqichdan, xomashyo yetishtirish va yig'ib olish jarayonidan boshlanishi lozim [3]. Agrotexnik tadbirlarni to'g'ri tashkil etish, hosilni o'z vaqtida yig'ib olish, tezkor quritish va namlikni me'yoriy darajaga tushirish mikotoksin hosil bo'lishining oldini olishda muhim ahamiyatga ega [4]. Saqlash bosqichida ventilyatsiya tizimini yo'lga qo'yish, namlik va haroratni muntazam monitoring qilish, omborlarda sanitariya-gigiyena talablariga qat'iy rioya etish zarur. Don mahsulotlari uchun namlik 12–13% dan oshmasligi, yog'li mahsulotlar esa quruq va salqin muhitda saqlanishi tavsiya etiladi [5].

Aniqlash va nazorat qilishda zamonaviy yuqori sezgir analitik metodlardan (LC-MS/MS, HPLC-DAD) foydalanish muntazam monitoring tizimini shakllantirishga imkon beradi. Tezkor skrining usullarini (immunoanalitik testlar) ishlab chiqarish bosqichiga joriy etish dastlabki baholash uchun samarali vosita bo'lishi mumkin [6]. Kamaytirish choralariga kelsak, biologik detoksikasiya ekologik xavfsiz usul sifatida istiqbolli yo'nalish hisoblanadi. Adsorbentlardan foydalanish, ayniqsa, yem-xashak sanoatida samarali. Fizik va kimyoviy usullarni esa mahsulot sifat ko'rsatkichlarini saqlagan holda, optimal parametrlar asosida qo'llash lozim [7]. Eng yuqori natija kombinatsiyalangan yondashuvda kuzatiladi [8]. Shu bilan birga, milliy miqyosda mikotoksin monitoring dasturini takomillashtirish, oziq-ovqat xavfsizligi bo'yicha ishlab chiqaruvchilar uchun majburiy laboratoriya nazoratini kuchaytirish, fermer va ishlab chiqaruvchilar uchun mikotoksinlar profilaktikasi bo'yicha amaliy qo'llanmalar ishlab chiqish, biotexnologik asoslangan yangi detoksikasiya usullarini (enzimatik parchalanish, probiotik shtammlar) joriy etish va iste'molchilar xabardorligini oshirish ham oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlashda muhim chora-tadbirlar sifatida hisoblanadi [9].

Hozirgi kunda global oziq-ovqat tarmog'ida mikotoksinlar nazorati Codex Alimentarius va Yevropa Oziq-ovqat Xavfsizligi Agentligi (EFSA) tomonidan belgilangan maksimal limitlar asosida amalga oshiriladi. Masalan, aflatoksin B₁ uchun maksimal limit 20 µg/kg, ochratoksin A uchun 5 µg/kg va patulin uchun 10 µg/kg hisoblanadi. Ushbu standartlar oziq-ovqat mahsulotlarining xavfsizligini ta'minlash va iste'molchilarni toksinlardan himoya qilishda asosiy ko'rsatkich sifatida xizmat qiladi [10].

Mikotoksinlarning mavjudligi nafaqat xomashyo sifatiga, balki mahsulotning saqlash va qayta ishlash sharoitlariga ham bog'liq. Yuqori namlik, noto'g'ri saqlash sharoitlari va uzoq vaqt transport toksinlarning ko'payishiga olib keladi [11]. Shu bois, zamonaviy analitik metodlar yordamida mikotoksinlarni aniqlash, ularning miqdorini baholash va kamaytirish usullarini ilmiy jihatdan asoslash muhim ahamiyatga ega.

Metodlar. Oziq-ovqat mahsulotlarida mikotoksinlarni aniqlash va ularni kamaytirish jarayonini o'rganish uchun namunalar sifatida bug'doy, yong'oq va quritilgan mevalar tanlandi. Har bir mahsulot

turidan 10 ta mustaqil namunalar olinib, jami 500 g dan ortiq miqdorda laboratoriya sharoitida ishlov berildi. Namunalar havo o'tmaydigan idishlarda, salqin va qorong'i sharoitda saqlanib, mikotoksinlar miqdorining o'zgarishini oldini olishga e'tibor qaratildi. Mikotoksinlar miqdorini aniqlashda yuqori sezgirlik va ishonchlilikni ta'minlovchi zamonaviy analitik metodlar qo'llanildi.

Namunalardan mikotoksinlarni chiqarish va tozalash jarayoni quyidagicha amalga oshirildi: bug'doy va yong'oq mahsulotlari 80% metanol yordamida gomogenlashtirildi va sonikatsiya yordamida ekstraksiya qilindi, quritilgan mevalar esa suv-etanol (50:50) eritmasi bilan ishlov berildi. Ekstraktlar sentrifugatsiyadan o'tkazilib, qattiq fazali ekstraksiya (SPE) kolonkasi orqali keraksiz qoldiqlardan tozalanadi.

Mikotoksinlarni aniqlash uchun LC-MS/MS va HPLC-DAD metodlari ishlatildi. LC-MS/MS yordamida aflatoksin B1 va ochratoksin A aniqlanib, C18 kolonkasi (2.1×100 mm, 1.7 μm), suv + 0,1% formik kislota / acetonitril gradienti va ESI detektor (MRM rejimi) qo'llanildi. Patulin esa HPLC-DAD orqali aniqlanib, C18 kolonkasi (250×4.6 mm, 5 μm), suv + 0,1% asetik kislota / metanol gradienti va 276 nm detektor ishlatildi. Har bir mikotoksin uchun miqdoriy aniqlash μg/kg birlikda olib borildi.

Mikotoksinlarni kamaytirish bo'yicha turli usullar sinovdan o'tkazildi. Bug'doy mahsulotlaridagi aflatoksin B1 ni termik ishlov (180°C, 30 daqika) yordamida kamaytirish, ochratoksin A ni *Lactobacillus* spp. fermentatsiyasi orqali biotransformatsiya qilish, yong'oqdagi aflatoksin B1 ni aktiv uglerod adsorbenti yordamida bog'lash, patulinni NaHCO₃ eritmasi bilan kimyoviy detoksikasiya qilish va quritilgan mevalarda ochratoksin A ni UV-C nurlanishi yordamida yuzaki yo'q qilish metodlari sinovdan o'tkazildi. Har bir usulning samaradorligi foiz ko'rinishida baholandi, toksinlar miqdorining kamayishi xalqaro standartlar (Codex Alimentarius, EFSA) bilan solishtirildi [12].

Analitik metodlar validatsiyasi uchun LOD (Detection limit), LOQ (Quantification limit), recovery (%), RSD (%) va linearlik (R²) ko'rsatkichlari aniqlanib, natijalar ishonchliliigi ta'minlandi. Ushbu metodlar mikotoksinlarni aniqlash va kamaytirish samaradorligini ilmiy jihatdan baholash imkonini beradi [13].

Barcha eksperimental tadqiqotlar uch martalik takrorlanishda amalga oshirildi. Olingan natijalar o'rtacha qiymat ± standart og'ish (M ± SD) ko'rinishida ifodalandi. Variatsiya koeffitsiyenti 5% dan oshmadi. Statistik ishonchlilik Student t-testi asosida baholandi va p < 0,05 qiymat sezilarli farq sifatida qabul qilindi. Ushbu yondashuv laboratoriya monitoringini kuchaytirish, saqlash va qayta ishlash jarayonlarini optimallashtirish hamda iste'molchilarni toksinlardan himoya qilishga xizmat qiladi [14].

Natijalar. Tajriba davomida, turli oziq-ovqat mahsulotlarida mikotoksinlar – aflatoksin B1, ochratoksin A va patulin – aniqlanib, ularning konsentratsiyasi tizimli ravishda baholandi. Barcha analizlar LC-MS/MS va HPLC-DAD metodlari yordamida amalga oshirildi. Ushbu metodlar past konsentratsiyadagi toksinlarni aniqlash va miqdoriy baholashda yuqori sezgirlik va ishonchlilikni ta'minlaydi. Mikotoksinlar mahsulot turlariga ko'ra quyidagi tarzda taqsimlandi:

Mikotoksinlar miqdori (mahsulot turlari bo'yicha)

1-jadval.

Mahsulot turi	Mikotoksin turi	Aniqlangan miqdor (μg/kg)	Codex Alimentarius limitlari (μg/kg)
Bug'doy	Aflatoksin B1	15,2	20
Bug'doy	Ochratoksin A	3,5	5
Yong'oq	Aflatoksin B1	12,8	15
Yong'oq	Ochratoksin A	2,9	5
Quritilgan meva	Patulin	5,6	10
Quritilgan meva	Ochratoksin A	1,2	5

Izoh:

Bug'doy. Aflatoksin B1 va ochratoksin A darajalari bug'doyning saqlash sharoitlari, namlik va zamburug'lar faolligi bilan bog'liq. Analitik metodlar ushbu konsentratsiyani ishonchli aniqlash imkonini berdi.

Yong'oq. Lipid fraksiyasi tufayli toksinlar biroz ko'proq bioakkumulyatsiyalangan. LC-MS/MS va HPLC-DAD natijalari orqali ularning miqdori aniq o'lehandi.

Quritilgan meva. Patulin miqdori yuqoriroq bo'lishiga qaramay, ochratoksin A minimal darajada aniqlangan. Bu mahsulotning sirti zararlanganlikmi darajasini ko'rsatadi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, bug'doy, yong'oq va quritilgan mevalarda aflatoksin B1, ochratoksin A hamda patulin mavjudligi aniqlanib, ularning miqdori zamonaviy LC-MS/MS va HPLC-DAD metodlari yordamida ishonchli baholandi. Aniqlangan ko'rsatkichlar xalqaro me'yoriy talablardan oshmagan bo'lsa-da,

ayrim namunalarda mikotoksinlar miqdori ruxsat etilgan chegaralarga yaqin ekanligi kuzatildi, bu esa doimiy monitoring zarurligini tasdiqlaydi.

Mikotoksinlarni kamaytirish usullari

2-jadval.

Mahsulot turi	Mikotoksin turi	Aniqlangan miqdor ($\mu\text{g/kg}$)	Kamaytirish usuli	Usul samaradorligi
Bug'doy	Aflatoksin B1	15,2	Termik ishlov (180°C , 30 min)	45
Bug'doy	Ochratoksin A	3,5	Biologik fermentatsiya (<i>Lactobacillus</i> spp.)	60
Yong'oq	Aflatoksin B1	12,8	Adsorbent (aktiv uglerod)	80
Yong'oq	Ochratoksin A	2,9	Biologik fermentatsiya (<i>Lactobacillus</i> spp.)	60
Quritilgan meva	Patulin	5,6	Kimyoviy detoksikasiya (NaHCO_3)	70
Quritilgan meva	Ochratoksin A	1,2	UV-C nurlanishi	40

Izoh:

Bug'doy – Aflatoksin B1

Bug'doy namunalarida aflatoksin B1 miqdori $15,2 \mu\text{g/kg}$ ni tashkil etdi. Ushbu ko'rsatkich LC-MS/MS metodi yordamida, C18 kolonkasi va ESI ionlash rejimida aniqlanib, yuqori sezgirlik va aniqlik bilan baholandi. Termik ishlov (180°C , 30 daqiqa) qo'llanilganda toksin miqdori 45% ga kamaydi. Bu jarayon aflatoksin molekulasiining lakton halqasi va boshqa funksional guruhlarining parchalanishi bilan izohlanadi.

Shu bilan birga, yuqori harorat oqsillar va ayrim biologik faol moddalarga qisman ta'sir ko'rsatishi mumkinligi sababli, sanoat miqyosida optimal harorat va vaqt parametrlarini tanlash muhim hisoblanadi. Olingan natijalar termik ishlov aflatoksin B1 ni kamaytirishda o'rtacha samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatdi.

Bug'doy – Ochratoksin A

Bug'doy namunalarida ochratoksin A $3,5 \mu\text{g/kg}$ miqdorda aniqlandi. Aniqlash LC-MS/MS yordamida amalga oshirildi. Kamaytirish maqsadida biologik fermentatsiya – *Lactobacillus* spp. ishtirokida biotransformatsiya usuli qo'llanildi. Natijada toksin miqdori 60% ga pasaydi.

Mikroorganizmlar ochratoksinni hujayra devoriga bog'lash yoki metabolik parchalanish orqali zararsiz shakllarga aylantiradi. Ushbu usulning afzalligi shundaki, u ozuqa tarkibini sezilarli darajada o'zgartirmaydi va ekologik xavfsiz hisoblanadi. Shu bois biologik usul oziq-ovqat sanoatida istiqbolli yo'nalish sifatida baholanadi.

Yong'oq – Aflatoksin B1

Yong'oq namunalarida aflatoksin B1 miqdori $12,8 \mu\text{g/kg}$ ni tashkil etdi. Yong'oq yog'li mahsulot bo'lgani sababli mikotoksinlar ko'proq to'planish xususiyatiga ega. Kamaytirish uchun aktiv uglerod asosidagi adsorbent qo'llanildi va 80% samaradorlikka erishildi. Adsorbsiya jarayonida toksin molekullari aktiv uglerodning keng yuzali tuzilmasiga bog'lanadi va mahsulotdan ajratiladi. Ushbu metod yuqori samaradorlikka ega bo'lib, mahsulotning organoleptik xususiyatlarini saqlab qoladi. Laboratoriya natijalari uning sanoat sharoitida ham qo'llash mumkinligini ko'rsatadi.

Yong'oq – Ochratoksin A

Yong'oq namunalarida ochratoksin A $2,9 \mu\text{g/kg}$ miqdorda aniqlanib, biologik fermentatsiya orqali 60% ga kamaytirildi. Mikroorganizmlar toksinni bog'lash va metabolik o'zgartirish orqali uning biologik faolligini pasaytiradi. Bu usul kimyoviy moddalar qo'llamasdan toksinni kamaytirish imkonini beradi. Biroq yog'li muhitda mikrobiologik jarayonlarning samaradorligi mahsulotning namligi va saqlash sharoitiga bog'liq ekanligi kuzatildi.

Quritilgan meva – Patulin

Quritilgan mevalarda patulin $5,6 \mu\text{g/kg}$ miqdorda aniqlandi. Aniqlash HPLC-DAD (276 nm) yordamida amalga oshirildi. Kimyoviy detoksikasiya – natriy bikarbonat (NaHCO_3) eritmasi qo'llanilganda patulin miqdori 70% ga kamaydi. Kimyoviy reaksiya natijasida patulin molekulasini parchalanadi yoki kam toksik shaklga o'tadi. Biroq bu jarayon ayrim vitaminlar va flavonoid moddalarning kamayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli kimyoviy usul qo'llanganda mahsulot sifat ko'rsatkichlari ham nazorat qilinishi lozim.

Quritilgan meva – Ochratoksin A

Quritilgan mevalarda ochratoksin A 1,2 µg/kg miqdorda aniqlandi. UV-C nurlanishi qo'llanilganda toksin miqdori 40% ga kamaydi. UV-C nurlanishi mahsulotning sirt qatlamiga ta'sir qiladi va toksin molekulasining fotokimyoviy parchalanishini ta'minlaydi. Biroq nurlanish chuqur qatlamlarga yetib bormasligi sababli samaradorlik nisbatan pastroq bo'ldi. Shu bois ushbu metodni kimyoviy yoki biologik usullar bilan birgalikda qo'llash maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Mikotoksinlarni kamaytirish bo'yicha qo'llanilgan usullar turli darajada samaradorlik berdi. Eng yuqori natija yong'oqdagi aflatoksin B1 ni aktiv uglerod yordamida kamaytirishda (80%) kuzatildi. Kimyoviy detoksikasiya patulinni 70% ga, biologik fermentatsiya esa ochratoksin A ni 60% gacha kamaytirdi. Termik ishlov va UV-C nurlanishi esa nisbatan o'rtacha (40–45%) namoyon bo'ldi.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, mikotoksinlarni kamaytirishda mahsulot turi va uning fizik-kimyoviy xususiyatlari muhim rol o'ynaydi. Yog'li mahsulotlarda adsorbsiya usuli samaraliroq bo'lsa, don mahsulotlarida biologik fermentatsiya istiqbolli hisoblanadi. Quritilgan mevalarda esa kombinatsiyalangan yondashuv (kimyoviy + fizik yoki biologik) yuqori natija berishi mumkin.

Qo'llanilgan analitik metodlarning ishonchligini ta'minlash maqsadida validatsiya ko'rsatkichlari aniqlanib baholandi. Limit of Detection (LOD), Limit of Quantification (LOQ), tiklanish darajasi (Recovery), takrorlanuvchanlik (RSD %) va linearlik koeffitsiyenti (R^2) hisoblab chiqildi.

3-jadval.

Metod validatsiyasi

Ko'rsatgich	Aflatoksin B1	Ochratoksin A	Patulin
LOD (mg/kg)	0,05	0,08	0,10
LOQ (mg/kg)	0,15	0,25	0,30
Recovery (%)	92-98	89-95	90-97
RSD (%)	<5	<6	<5
R^2	0,998	0,997	0,996

Kalibrovka egri chiziqlari 5 nuqtali konsentratsiya oralig'ida qurildi va barcha mikotoksinlar uchun $R^2 \geq 0,996$ qiymat qayd etildi, bu metodning yuqori linearligini ko'rsatadi. Recovery ko'rsatkichlari 89–98% oralig'ida bo'lib, metodning aniqligi va selektivligini tasdiqladi. RSD qiymati 6% dan oshmadi, bu takrorlanuvchanlik yuqori ekanligini bildiradi.

Muhokama. O'tkazilgan tajriba natijalari oziq-ovqat mahsulotlarida mikotoksinlar hosil bo'lishi va saqlanib qolishi ko'p omilli jarayon ekanligini tasdiqladi. Tanlangan namunalar – bug'doy, yong'oq va quritilgan mevalar – oziq-ovqat zanjirida keng qo'llaniladigan mahsulotlar bo'lib, ularning har biri o'ziga xos fizik-kimyoviy tarkibga ega. Aynan shu xususiyatlar mikotoksinlarning to'planish darajasi va kamaytirish usullarining samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatdi.

Bug'doy namunalarida aflatoksin B1 (15,2 µg/kg) va ochratoksin A (3,5 µg/kg) aniqlanishi don mahsulotlarining saqlash jarayonida namlik va haroratga sezgirlikni yana bir bor tasdiqlaydi. Tajriba davomida namuna tayyorlash, ekstraksiya va SPE tozalash bosqichlarining to'g'ri tanlanishi LC-MS/MS yordamida past konsentratsiyalardagi toksinlarni ishonchli aniqlash imkonini berdi. Termik ishlov (180°C, 30 daqqa) natijasida aflatoksin B1 miqdorining 45% ga kamayishi toksinning yuqori harorat ta'sirida qisman parchalanishini ko'rsatdi. Biroq tajriba sharoitida oqsil fraksiyasi va ayrim issiqlikka sezgir vitaminlarning kamayishi kuzatildi, bu esa usulni sanoat miqyosida qo'llashda optimal parametrlarni tanlash zarurligini anglatadi.

Ochratoksin A ni biologik fermentatsiya orqali 60% ga kamaytirish tajribasi mikrobiologik detoksikasiyaning istiqbolli yo'nalish ekanligini ko'rsatdi. *Lactobacillus* spp. ishtirokida olib borilgan fermentatsiya jarayonida toksinning qisman hujayra devoriga bog'lanishi va metabolik o'zgarishi qayd etildi. Tajriba davomida pH ko'rsatkichining pasayishi va fermentatsiya muddati oshishi bilan kamayish darajasi ortishi kuzatildi. Bu holat mikroorganizmlarning faol metabolik jarayoni bilan bog'liq ekanligi taxmin qilinadi.

Yong'oq namunalarida aflatoksin B1 (12,8 µg/kg) va ochratoksin A (2,9 µg/kg) mavjudligi yog'li matritsaning mikotoksinlarni saqlab qolish xususiyati bilan izohlanadi. Tajribada aktiv uglerod qo'llanilganda aflatoksin B1 miqdori 80% ga kamaydi. Adsorbsiya jarayonining yuqori samaradorligi aktiv uglerodning katta sirt maydoni va yuqori porozligi bilan bog'liq. Shu bilan birga, tajriba natijalari adsorbent miqdori va kontakt vaqti oshirilganda kamaytirish darajasi ham ortishini ko'rsatdi. Ochratoksin A ga nisbatan biologik fermentatsiya 60% samaradorlik berdi, ammo yog'li muhit fermentatsiya jarayonini nisbatan sekinlashtirishi kuzatildi. Bu mahsulotning suv faolligi pastligi bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

Quritilgan mevalarda patulin (5,6 µg/kg) va ochratoksin A (1,2 µg/kg) aniqlanishi xomashyo sifatiga hamda quritish jarayonidagi gigiyenik omillarga bog'liq ekanligini ko'rsatadi. HPLC-DAD yordamida patulin miqdorini aniqlash yuqori aniqlikni ta'minladi. Natriy bikarbonat eritmasi bilan ishlov berilganda patulin miqdori 70% ga kamaydi. Tajriba davomida pH muhitining ishqoriy tomonga siljishi patulin molekulasi parchalanishiga olib kelgani kuzatildi. Biroq ayrim antioksidant birikmalar miqdorining kamayishi qayd etildi, bu esa mahsulotning biologik qiymatiga ta'sir qilishi mumkin.

UV-C nurlanishi ochratoksin A ni 40% ga kamaytirdi. Tajriba shuni ko'rsatdiki, nurlanish intensivligi va ekspozitsiya vaqti oshirilganda kamayish darajasi ortadi, biroq mahsulotning tashqi ko'rinishi va rang ko'rsatkichlarida o'zgarishlar yuz berishi mumkin. UV-C nurlanishi asosan yuzaki qatlamga ta'sir qilgani sababli, ichki qatlamlarda saqlanib qolgan toksin to'liq parchalanmadi.

Umuman olganda, tajriba natijalari mikotoksinlarni kamaytirishda mahsulot turiga moslashtirilgan va ilmiy asoslangan yondashuv zarurligini ko'rsatdi. Fizik (termik, UV), kimyoviy (NaHCO₃) va biologik (fermentatsiya) usullar turli darajada samaradorlikka ega bo'lib, ularning kombinatsiyasi yanada yuqori natija berishi mumkin. Tajriba asosida aniqlangan ma'lumotlar oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlash, saqlash sharoitlarini optimallashtirish va sanoat miqyosida mikotoksin monitoring tizimini takomillashtirish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Xulosa. Xulosa qilib aytganda, mikotoksinlar bilan ifloslanish oziq-ovqat mahsulotlari xavfsizligiga ta'sir etuvchi muhim va ko'p omilli jarayon ekanligi ilmiy jihatdan asoslandi. Tadqiq etilgan bug'doy, yong'oq va quritilgan meva namunalari tarkibida aflatoksin B1, ochratoksin A hamda patulin aniqlanib, ularning miqdori zamonaviy yuqori sezgir va selektiv analitik metodlar yordamida ishonchli miqdoriy baholandi.

Mikotoksinlar shakllanishi va saqlanib qolishi mahsulotning fizik-kimyoviy xususiyatlari, namlik darajasi, saqlash sharoiti hamda biologik omillar bilan bevosita bog'liqligini ko'rsatdi. Detoksikasiya usullarining qiyosiy tahlili mahsulot matritsasiga moslashtirilgan texnologik yondashuv yuqori samaradorlik berishini tasdiqladi. Adsorbsion, biologik va kimyoviy usullar turli darajada natija ko'rsatgan bo'lsa-da, ularni kompleks qo'llash toksin miqdorini kamaytirishda eng maqbul natijani ta'minlashi aniqlandi.

Mikotoksin xavfini minimallashtirish profilaktik agroteknik choralarni takomillashtirish, saqlash jarayonlarini optimallashtirish, muntazam laboratoriya monitoringini yo'lga qo'yish hamda ilmiy asoslangan detoksikasiya strategiyalarini qo'llash orqali amalga oshirilishi lozim. Ko'p bosqichli tizimli nazorat mexanizmini shakllantirish oziq-ovqat xavfsizligini barqaror ta'minlashning ustuvor sharti hisoblanadi.

ADABIYOTLAR:

1. Schneidemann-Bostelmann S, Otting Y, Dick F, et al. (2026). *Mycotoxin occurrence and risk assessment in plant-based meat alternatives. Mycotoxin Research*, 42, 22.
2. Lee SY, Woo SY, Park SB, et al. (2025). *Multi-mycotoxin occurrence and risk assessment in foods by LC-MS/MS. Food Research International*, 221, 117500.
3. Khan R, Anwar F, Ghazali FM. (2024). *Comprehensive review of mycotoxins: detection and mitigation. Heliyon*, 10(8), e28361.
4. Qiu N, Sun D, Zhou S, et al. (2022). *UHPLC-MS/MS determination of 43 mycotoxins. Journal of Advanced Research*, 39, 15–47.
5. Bessaire T, Mujahid C, Mottier P, Desmarchelier A. (2019). *Multiple mycotoxin determination by LC-MS/MS. Toxins*, 11(11), 658.
6. Peng H, Chang Y, Baker RC, et al. (2020). *Interference of mycotoxin binders with LC-MS/MS analysis. Food Additives & Contaminants Part A*, 37(3), 496-506.
7. Alshannaq A, Yu JH. (2017). *Occurrence and analysis of major mycotoxins. International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(6), 632.
8. Karlovsky P, Suman M, Berthiller F, et al. (2016). *Impact of food processing on mycotoxins. Food and Chemical Toxicology*, 89, 122–133.
9. Adebo OA, Njobeh PB, Kayitesi E. (2020). *Biodegradation of mycotoxins using lactic acid bacteria. Food Research International*, 129, 108876.
10. Ortega-Beltran A, Bandyopadhyay R. (2021). *Biological control of aflatoxin contamination. Toxins*, 13(1), 33.
11. Alshannaq A, Yu JH, Park D. (2023). *Multi-mycotoxin screening in cereals by UHPLC-MS/MS. Food Control*, 150, 109777.

12. Tittlemier SA, Cramer B, Dall'Asta C. (2022). *Advances in LC-MS/MS detection of mycotoxins. Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(12), 3584–3602.
13. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. (2023). *Risk assessment of aflatoxins in food. EFSA Journal*, 21(3), e07845. doi:10.2903/j.efsa.2023.7845
14. Eskola M, Kos G, Elliott CT, et al. (2020). *Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(16), 2771–2790.

NUMPY KUTUBXONASINING SUYUQLIK VA GAZ MEXANIKASI MASALALARIDAGI QO‘LLANILISH IMKONIYATLARI

Shirinov Ziyomat Zoyirovich,

Buxoro davlat universiteti o‘qituvchisi, t.f.f.d., PhD

ziyomatshirinov@umail.uz

Jumayeva Gulhayo Bahodirovna,

Buxoro davlat universiteti magistranti

Jumayevagulhayo53@gmail.com

Annotatsiya. Bu ishda python dasturlash tilida massivlar bilan ishlash imkoniyatlari tahlili keltirilgan bo‘lib, unda asosan Numpy kutubxonasining imkoniyatlaridan suyuqlik va gaz harakatini sonli o‘rganish jarayonida qo‘llashning afzalliklari keltirilgan. Bir va ikki o‘lchovli massivlarning elementlariga ikki usulda qiymat berishda dasturning bajarilish vaqtini kam sarflovchi usul qanday bo‘lishi ko‘rsatilgan. Ikki o‘lchovli massivning kichik/katta qiymatlarni aniqlashda Numpy kutubxonasidan foydalanishning afzalligi misollar bilan izohlangan.

Kalit so‘zlar: Numpy, vaqt, massiv, suyuqlik va gaz, chekli ayirmali sxema, sonli usul, boshlang‘ich va chegaravish shartlar, dasturlash tili, massivning elementi.

APPLICATION POSSIBILITIES OF THE NUMPY LIBRARY IN FLUID AND GAS MECHANICS PROBLEMS

Abstract. In this research presents an analysis of the possibilities of working with arrays in the Python programming language, mainly presenting the advantages of using the capabilities of the Numpy library in the process of numerical study of fluid motion. It shows how to assign values to elements of one- and two-dimensional arrays in two ways, which consumes less program execution time. The advantages of using the Numpy library in determining the minimum/maximum values of a two-dimensional array are explained with examples.

Keywords: Numpy, time, array, liquid and gas, finite difference scheme, numerical method, initial and boundary conditions, programming language, element of array.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БИБЛИОТЕКИ NUMPY В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Аннотация. В данной работе представлен анализ возможностей работы с массивами на языке программирования Python, при этом основное внимание уделено преимуществам использования библиотеки NumPy в процессе численного исследования движения жидкостей и газов. Показано, какой из двух способов задания значений элементам одномерных и двумерных массивов требует меньше времени выполнения программы. Также на примерах объяснены преимущества использования библиотеки NumPy при определении минимальных и максимальных значений двумерных массивов.

Ключевые слова: NumPy, время, массив, жидкость и газ, конечно-разностная схема, численный метод, начальные и граничные условия, язык программирования, элемент массива.

Kirish. Suyuqlik va gazlar mexanikasi, umuman olganda, mexanika masalalari ularga qo‘yiladigan boshlang‘ich va chegaravish shartlar inobatga olingan holda yechiladi. Agarda masalani sonli usullardan foydalangan holda yechishga to‘g‘ri kelsa bu shartlarni dasturlash tilida ifodalashda massivlardan foydalaniladi. Shuning bilan birgalikda, dastur ma‘lum bir qadamlarda bajarilganda oldingi qadam ma‘lumotlaridan keyingi qadamda foydalaniladi. Misol sifatida chekli ayirmali sxemalarnida joriy vaqt birligida olingan natijalar keyingi qadamga boshlang‘ich qiymatlar sifatida foydalanish uchun uzatiladi[1]. Bunday yo‘l tutilishiga asosiy sabab ma‘lumotlarning kompyuter xotirasidan ortiqcha joy egallamasligi va natijada kompyuter xotirasi ortiqcha band bo‘lishidan saqlanadi.

Bu jarayoni tashkillashtirishda ikkita alohida massiv olinadi [2]. Birinchi massiv biror bir xususiyatning dastlabki qiymatlarini qabul qiladi. Ikkinchi massiv esa joriy hisoblash natijasini saqlash uchun ishlatiladi. Hisoblash jarayonida esa dastlabki qiymatlarni saqlovchi massivdan foydalaniladi. Joriy hisoblash bajarilgach

hisoblash natijasida hosil bo'lgan massivdan foydalanish uchun uni dastlabki qiymatlarni saqlovchi massiv sifatida aniqlash kerak. Buni amalga oshirish ilgari natijaviy massivning har bir elementi qiymati dastlabki massivning mos elementiga o'zlashtirish operatori yordamida o'tkazilar edi. Natijada har bir elementga murojaat qilish uchun takrorlash jarayoni tashkil qilinar va bu jarayon bir vaqtning o'zida dasturning bajarilish vaqtini hamda dastur yozishga sarflanadigan vaqtning ko'proq sarflanishiga olib kelar edi. Shu bilan bir qatorda dasturdagi xatoliklarni qayta ishlashda anchagi noqulayliklarga ham sabab bo'lar edi.

Bugungi kunga kelib python dasturlash tili imkoniyatlarining oshishi va kutubxonalarining rivojlanish natijasida yuqorida aytib o'tilgan masala juda sodda ko'rinishda hal qilsa bo'ladigan holga kelgan. Pythonda ilmiy hisoblash uchun NumPy nomli asosiy paketi mavjud bo'lib u N o'lchovli massivlarda chiziqli algebradagi kabi asosiy matematik operatsiyalarni elementma-element bajaradi. Ya'ni A va B ikki o'lchovli bir xil o'lchamdagi ndarray larni ko'paytirganda, A massivning n_{ij} elementi B massivning n_{ij} elementiga ko'paytiriladi [2]. Qolgan asosiy matematik operatsiyalar ham xuddi shu taqlid bajariladi.

Python dasturlash tilida ma'lumotlar saqlashning eng mashhur usullar bu ro'yxatlar va lug'atlar bo'lib, ro'yxat deyarli har qanday Python obyektini element sifatida saqlash imkoniyatiga ega. Ammo ro'yxatdagi elementlar ustida ishlash faqat iterativ takrorlash orqali amalga oshirilishi natijasida hisoblash jarayonini samarasiz qilib qo'yishi mumkin. NumPy paketi foydalanuvchilarga ndarray deb nomlangan ma'lumotlarni saqlash obyektini taqdim etish orqali Python ro'yxatlarining kamchiliklarini bartaraf etish imkonini beradi [2].

Yuqoridagilarga qo'shimcha ravishda bu kutubxonada bazi metodlar aniqlangan bolib, ular ham yuqorida aytilgan ndarray ning imkoniyatlaridan foydalanilagan. Bularga massivning eng katta qiymatga ega elementi qiymatini aniqlash uchun max() metodi, eng kichik qiymatga ega elementi qiymatini aniqlash uchun min() metodlari aniqlangan [3]. Bu metodlar takrorlash orqali aynan shu ishni bajarishdan ko'ra ancha samarali bo'lib hisoblanadi.

NumPy kutubxonasining fromfunction metodi yangi massivni uning elementlari indeksleri qiymatlaridan kelib chiqib foydalanuvchi bergan funksiya asosida hosil qilib beradi. Uning bu xususiyati boshlang'ich shartlarni berishda va ba'zi hisoblash jarayonlarning element indeksiga mos funksiya shaklida ifodalash mumkin bo'lgan joylarda juda qo'l kelishi mumkin [4].

Numpy kutubxonasining bu imkoniyati sababidan dasturchilarda oddiy savol tug'ulishi tabiiy, bu imkoniyat dasturning bajarilish vaqtiga qanday ta'sir qiladi. Pythonning ndarray ob'ektini operatsiyasi takrorlash operatsiyasiga qaraganda ~25 tezroq ishlaydi [2]. Quyida biz mexanika masalalarini sonli usullar yordamida yechishda qo'llanilishi mumkin bo'lgan ba'zi asosiy matematik operatsiyalarni bajarishda qaysi usulni tanlash maqsadga muvofiq bo'lishini tadqiq qilamiz.

Tadqiqot metodologiyasi. Dasturlash tillarida bir o'lchovli, ikki o'lchovli va ko'p o'lchovli massiv tuzilishlari mavjud bo'lib ular ustida bajariladigan ba'zi amallar bir biridan farq qilishi mumkin [3]. Masalan, bir o'lchovli massivda elementlari soni degan tushuncha ikki o'lchovlida har bir qatordagi elementlar soni degan tushuncha bilan kengayadi. Mexanika masalalarini yechishda odatta ikki o'lchovli massivlardan foydalaniladi. Bu masalalarda chegaraviy va boshlang'ich shart hamda eng katta va eng kichik qiymatni aniqlash juda muhim o'rinini egallaydi. Numpy kutubxonasida esa bu qiymatlar bilan xuddi mexanika kurslarida berilganidek tasvirlash imkoni mavjud.

Chegaraviy va boshlang'ich shartlarning berilishini python dasturlash tilida ikki usulda yozib ularni dasturning bajarilish vaqti bo'yicha farqlarini aniqlaymiz. Buning uchun massivning barcha elementlari qiymati biror bir haqiqiy o'zgarmas son deb tasavvur qilamiz. Misolimizda o'zgarmas haqiqiy sonni 0.2 deb tanladik. Birinchi ilgari ishlatilgan usulda, ya'ni massivni e'lon qilib uni qiymatlar bilan to'ldiramiz:

```
b=[0]*n
bt = time.time()
for i in range(n):
    b[i]=1*0.2
bt1 = time.time()
```

Ikkinchi usulda esa xuddi shu ishni Numpy kutubxonasi imkoniyatlaridan foydalangan holatda amalga oshiramiz. Ya'ni Numpy kutubxonasining ones metodidan foydalanamiz. Bu metodning vazifasi massivning barcha elementlariga bir qiymatni berishdan iborat [5-6]. Uning elementlarini biror bir aniq haqiqiy son bilan to'ldirishga ehtiyoj bo'lganda esa, shu songa ko'paytirib qo'yishning o'zi yetarli:

```
at = time.time()
a = np.ones(n)*0.2
at1 = time.time()
```

Endi ikki o'lchovli massivning eng katta elementi qiymatini aniqlash uchun ham xuddi shu usullarni qo'llab ko'ramiz. Birinchi usulda uni quyidagicha yozamiz:

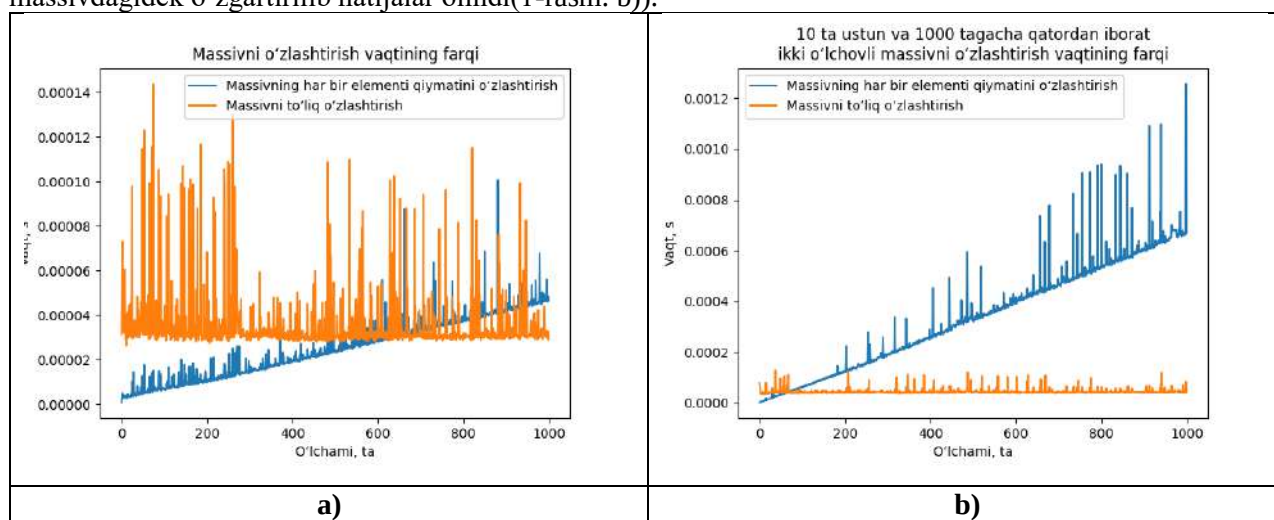
```
def kattaElement(K1,K2,KATTA):
    for i in range(1,np.size(K1, 0)):
        for j in range(1,np.size(K1, 1)):
            if(math.fabs(K1[i,j]-K2[i,j])>KATTA):
                KATTA=math.fabs(K1[i,j]-K2[i,j])
    return KATTA
bt = time.time()
KATTAe=kattaElement(W1,W, math.fabs(W1 [0,0]-W1[0,0]))
bt1 = time.time()
```

Ikkinchi usulda esa xuddi shu ishni Numpy kutubxonasi imkoniyatlaridan foydalangan holatda amalga oshiramiz:

```
at = time.time()
KATTAh=np.max(W1-W)
at1 = time.time()
```

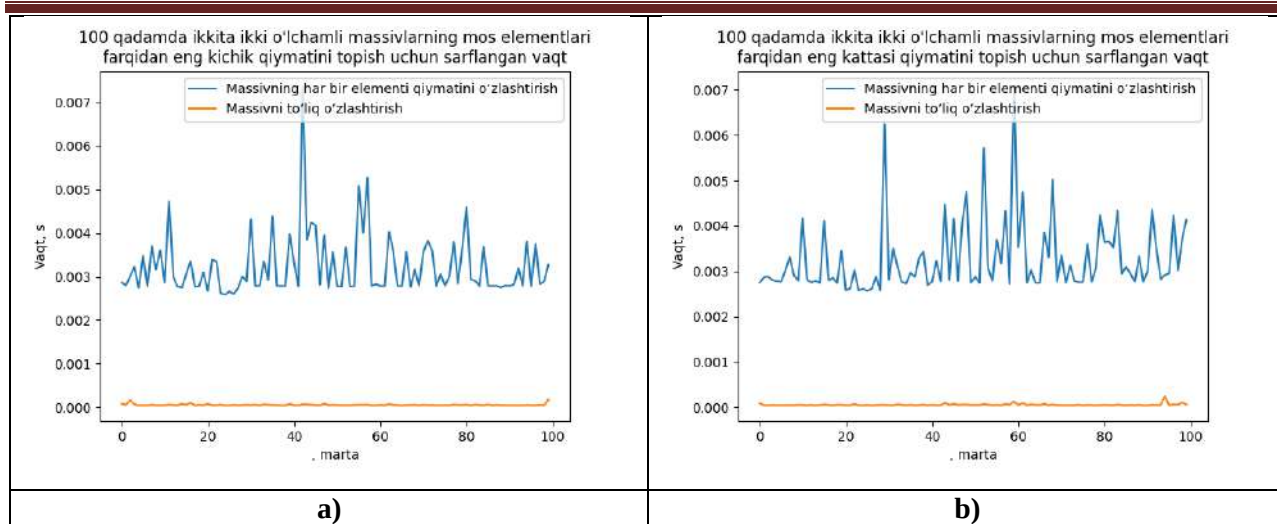
Ikki o'lovli massivning eng kichik qiymatini topish uchun ham yuqoridagi ikki usulda bajarilib ko'rildi va olingan natijalar tahlil qilindi.

Tadqiqot natijalari. Bir o'lovli massivning elementlarini qiymat bilan to'ldirishda massiv o'lchami bittadan mingtagacha bo'lgan hollar uchun tekshirib ko'rildi. Har bir holatda dasturning bajarilish vaqti ikki usulda alohida hisoblanib natijalar tahlil qilish uchun grafik ko'rinishida taqdim qilindi(1-rasm. a)). Dastur bajarilishi uchun sarflanayotgan vaqt dastur kodining aynan ajratilgan qismidan oldin va keyin kompyuterning joriy vaqti time funksiyasi orqali olinib ular orasidagi farq asosida aniqlandi. Ikki o'lovli massivning elementlarini qiymat bilan to'ldirishda o'nta ustun olinib qatorlari qiymati esa bir o'lovli massivdagidek o'zgartirilib natijalar olindi(1-rasm. b)).



1-rasm. Massivlarning elementlari qiymatini ikki usulda to'ldirilishidagi vaqt sarflari

Sonli usullar yordamida yechiladigan ba'zi mexanika masalarida joriy va dastlabki qadamda olingan qiymatlarning farqi ma'lum qiymatdan oshmaslik sharti beriladi. Buni esa dasturlashda massivning eng kichik o'rni kelganda eng katta qiymatini topish orqali hal qilinishi mumkin. Shu sababdan har ikki holni hisobga olgan holda ko'rib chiqdik. Umumiy holda 100x100 ikki o'lovli massiv olinib uni suyuqlik va gaz mexanika masalasi yechimida olingan natijalar bilan to'ldirildi. Tayyor massivlarning qiymatlari har qadamda o'zgartirilib, yuz qadamgacha har ikki usulning masala yechimi uchun qancha vaqt sarflashi aniqlandi. 2-rasm. a) grafikda massivning eng kichik qiymatini aniqlash uchun sarflangan vaqtlarning qiyosiy tahlili uchun ma'lumot keltirilgan 2-rasm. b) grafikda massivning eng katta qiymatini aniqlash uchun sarflangan vaqtlarning qiyosiy tahlili uchun ma'lumot keltirilgan.



2-rasm. Ikki o'lchovli massiv elementlarining eng kichigining/kattasining qiymatini ikki usulda topish uchun sarflangan vaqt

Muhokama. Birinchi rasmda massiv elementlarini qiymatlar bilan to'ldirish uchun sarlangan vaqt grafik ko'rinishida tasvirlangan. Rasmning a) qismida ko'k rangda keltirilgan egri chiziq massivni har bir elementiga o'zlashtirish operatori yordamida qiymat berishni ifodalaydi va bu usuldan 600 tagacha elementga ega massivlarda ikkinchi usulga qaraganda kam vaqt sarflanishini ko'rish mumkin. Rasmning b) qismi ikki o'lchovli o'nta ustunga ega massiv elementlariga yuqoridagi ikki usulda qiymat berilgan. Ko'k rangda keltirilgan egri chiziq massivni har bir elementiga o'zlashtirish operatori yordamida qiymat berishni ifodalaydi va bu usuldan dastlab ikkinchi usulga qaraganda kam vaqt sarflanishini ko'rish mumkin. Lekin u tezda ya'ni ma'lum sondagi qatorlardan so'ng darhol ko'p vaqt sarflay boshlagan.

Ikkinchi rasmda ikki o'lchovli massivning katta va kichik qiymatlarini topish uchun ikki usul sarflaydigan vaqtlarning farqi grafik usulda tasvirlangan. Bu yerda ko'k rangdagi egri chiziqda eng kichik/katta qiymatni massivdan oddiy usulda qidirib topish uchun sarflanadigan vaqt keltirilgan. Keyingi chiziq esa Numpy kutubxonasi imkoniyatlaridan foydalanilgan holda qancha vaqt sarflanishi keltirilgan. Bu grafiklardan har ikkala holda ham Numpy kutubxonasidan foydalanilgan holda ishlash tez natija berishini ko'rish mumkin.

Xulosa. Bir o'lchovli massiv elementlari soni besh yuztadan oshmagan holatda an'anaviy usulda qiymat berish yaxshi natija berishi mumkin. Ikki o'lchovli massivlarda esa Numpy kutubxonasidan foydalanilish deyarli barcha hollarda maqsadga muvofiq bo'ladi. Massivlarning elementlaridan eng kichik/kattasini aniqlashga to'g'ri kelganda esa Numpy kutubxonasidan foydalanilganda kam vaqt sarflanadi.

Bugungi kunda ma'lumotlar hajmining oshishi ularni tahlil qilishning samarali usullarini ishlab chiqishni talab qilmoqda. Buning uchun esa kundan kunga yangi usullar ishlab chiqilib ular amaliyotga joriy qilinmoqda. Python dasturlash tilining bu boradagi imkoniyatlari anchagina keng bo'lib Numpy kutubxonasidan mexanika masalalarini yechishda foydalanish soha mutaxassislarga anchagina yengilliklar olib keladi.

ADABIYOTLAR:

1. Smith G.D. *Numerical solution of Partial Differential Equations*(Third Edition), Oxford University Press, December 1984, P 336.
2. Eli Bressert. *SciPy and NumPy*. November 2012. <http://my.safaribooksonline.com>
3. Xu Weiwen & Yang Haoran. *Python Libraries for Data Analysis and Machine Learning*. 2022-4-1. <https://www.anaconda.com>
4. Robert Johansson. *Numerical Python*. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4246-9>
5. Charles R. Harris, and et. all *Array programming with NumPy*. 16 September 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
6. Bernd Klein. *Python Course Data Analysis With Python by Bernd Klein*. 2021. bernd.klein@python-course.eu

**AXBOROT XAVFSIZLIGI DARAJASINI BAHOLASHNING STATISTIK USULLARINI
QIYOSIY TAHLIL QILISH**

O‘rinov Nodirbek Toxirjonovich,

Andijon davlat universiteti dasturiy injiniring kafedrası dotsenti,

[*nodirbekurinov1@gmail.com*](mailto:nodirbekurinov1@gmail.com)

Tadjibayeva Nigoraxon Shakirovna,

Andijon davlat universiteti magistranti

[*nigoratadzibayeva311@gmail.com*](mailto:nigoratadzibayeva311@gmail.com)

Annotatsiya. Ushbu maqolada axborot xavfsizligi darajasini baholashning statistik usullari qiyosiy tahlil qilingan. ALE (Annual Loss Expectancy), Kortni usuli, Monte-Karlo simulyatsiyasi va ISRAM (Information Security Risk Analysis Method) usullari o‘rganilgan. Har bir usulning afzalliklari, kamchiliklari va qo‘llanilish sohalari aniqlangan. Tadqiqot natijalarida ALE usulining eng keng tarqalgan va amaliy usul ekanligi, boshqa usullar esa maxsus holatlarda samarali qo‘llanilishi ko‘rsatilgan. Tadqiqot tashkilotlarga o‘zlariga mos usulni tanlashda amaliy yordam beradi.

Kalit so‘zlar: axborot xavfsizligi, statistik usullar, xavfni baholash, ALE, Kortni usuli, Monte-Karlo, ISRAM, risk-menejment.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF STATISTICAL METHODS FOR ASSESSING THE LEVEL
OF INFORMATION SECURITY**

Abstract. This article presents a comparative analysis of statistical methods for assessing information security levels. The ALE (Annual Loss Expectancy), Courtney method, Monte Carlo simulation, and ISRAM (Information Security Risk Analysis Method) approaches are examined. The advantages, disadvantages, and application areas of each method are identified. Research results indicate that ALE is the most widely applied practical method, while other methods prove effective in specific scenarios. The study provides practical guidance for organizations in selecting appropriate assessment methods.

Keywords: information security, statistical methods, risk assessment, ALE, Courtney method, Monte Carlo, ISRAM, risk management.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УРОВНЯ
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Аннотация. В данной статье проведён сравнительный анализ статистических методов оценки уровня информационной безопасности. Изучены методы ALE (Annual Loss Expectancy), метод Кортни, имитационное моделирование Монте-Карло и ISRAM (Information Security Risk Analysis Method). Определены преимущества, недостатки и области применения каждого метода. Результаты исследования показывают, что метод ALE является наиболее распространённым и практическим методом, тогда как другие методы эффективно применяются в специальных случаях. Исследование оказывает практическую помощь организациям при выборе наиболее подходящего для них метода.

Ключевые слова: информационная безопасность, статистические методы, оценка риска, ALE, метод Кортни, Монте-Карло, ISRAM, риск-менеджмент.

Kirish. Hozirgi raqamli transformsiya davrida axborot xavfsizligi masalasi barcha tashkilotlar uchun strategik ahamiyat kasb etmoqda. Kiberjinoiyatlar soni yildan-yilga ortib bormoqda va tashkilotlar o‘z axborot aktivlarini himoya qilish uchun samarali usullardan foydalanish zaruratiga duch kelmoqda. Xalqaro tadqiqotlarga ko‘ra, so‘nggi yillarda kiberjinoiyatlar natijasida global iqtisodiyotga yetkazilgan zarar trillion dollarlar darajasiga yetgan. Bu holat axborot xavfsizligi sohasida ilmiy tadqiqotlar olib borish va samarali himoya choralarini ishlab chiqish zaruratini yanada kuchaytirmoqda.

Axborot xavfsizligi xavflarini baholash – bu tashkilotlarning axborot aktivlariga yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan tahdidlarni aniqlash, ularning ehtimolini va ta‘sirini hisoblash jarayonidir. Bu jarayonda statistik usullar muhim o‘rin tutadi, chunki ular xavflarni raqamli ko‘rsatkichlarda ifodalash va obyektiv baholash

imkonini beradi. Xavflarni miqdoriy baholash tashkilotlarga quyidagi imkoniyatlarni beradi: birinchidan, xavflarni moliyaviy yo'qotishlar ustuvorligiga muvofiq tartibga solish; ikkinchidan, axborot xavfsizligiga investitsiyalarni qaytarish samaradorligini hisoblash; uchinchidan, boshqaruv qarorlarini qabul qilishda aniq raqamli asoslarga ega bo'lish.

Axborot xavfsizligi sohasida xavflarni miqdoriy baholashning bir qancha statistik usullari ishlab chiqilgan. Bular orasida ALE (Annual Loss Expectancy – kutilayotgan yillik yo'qotishlar), Robert Kortni tomonidan ishlab chiqilgan Kortni usuli, Monte-Karlo simulyatsiyasi va ISRAM (Information Security Risk Analysis Method) usullarini alohida ajratib ko'rsatish mumkin. Har bir usulning o'ziga xos xususiyatlari, afzalliklari va kamchiliklari mavjud. Xalqaro amaliyot shuni ko'rsatadiki, xavfni miqdoriy baholash metodologiyasi xavf tahlilining to'liq versiyasiga mos keladi va axborot xavfsizligi talablari kuchaygan taqdirda qo'llaniladi.

Gordon-Lob iqtisodiy modeli axborot xavfsizligiga sarflanadigan xarajatlar va ularning samaradorligi o'rtasidagi muvozanatni ta'minlash muammosini hal qilishning matematik apparatini tavsiflovchi muhim nazariy asos hisoblanadi. Ushbu modelga ko'ra, axborot xavfsizligi tahdidlariga qarshi kurashishning asosiy usullari: kamaytirish (zaifliklarni bartaraf etish), uzatish (xarajatlarni uchinchi shaxslarga o'tkazish), qabul qilish (moliyaviy xaziralarni shakllantirish) va voz kechish (haddan tashqari xavfli faoliyatdan voz kechish) hisoblanadi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, Bishop (2019) axborot xavfsizligi sohasidagi umumiy tamoyillar va statistik usullarni tushuntirgan, Pfleeger va Pfleeger (2019) axborot xavfsizligi bo'yicha umumiy qo'llanmada statistik vositalar va xavflarni baholash bo'yicha tafsilotlar keltirgan, Jones va Jones (2017) axborot xavfsizligi statistikasini tahlil qilish va metrikalarini o'rganishga yo'naltirilgan tadqiqotlar olib borgan. Biroq, ushbu mualliflarning asarlarida turli statistik usullarning qiyosiy tahlili etarli darajada olib borilmagan.

Ushbu tadqiqotning maqsadi – yuqorida sanab o'tilgan statistik usullarni qiyosiy tahlil qilish, ularning afzalliklari va kamchiliklarini aniqlash hamda tashkilotlarga o'zlariga mos usulni tanlashda amaliy tavsiyalar berish. Tadqiqot savoli: "Axborot xavfsizligi xavflarini baholashda qaysi statistik usul eng samarali va qanday sharoitlarda qo'llanilishi maqsadga muvofiq?" Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, to'rtta asosiy statistik usulning olti mezon bo'yicha qiyosiy tahlili birinchi marta tizimli ravishda amalga oshirilgan va har bir usulning optimal qo'llanilish sohalari aniqlangan.

Materiallar va usullar. Tadqiqotda axborot xavfsizligi sohasidagi ilmiy adabiyotlar, xalqaro standartlar (ISO 27001, NIST SP 800-30) va amaliy tajribalar tahlil qilindi. Qiyosiy tahlil usulidan foydalanildi, bunda har bir statistik usulning nazariy asoslari, formulalari, qo'llanilish sohalari, afzalliklari va kamchiliklari tizimli ravishda o'rganildi.

ALE (Annual Loss Expectancy) usuli. ALE usuli xavflarni miqdoriy baholashning eng keng tarqalgan usuli hisoblanadi. Ushbu usulda kutilayotgan yillik yo'qotishlar quyidagi formulalar yordamida hisoblanadi:

$$SLE = EF \times AV$$

$$ALE = SLE \times ARO$$

Bu yerda: AV (Asset Value) — aktiv qiymati; EF (Exposure Factor) — ta'sir omili (foizda); SLE (Single Loss Expectancy) — yagona yo'qotish kutilishi; ARO (Annual Rate of Occurrence) — yillik sodir bo'lish chastotasi; ALE — kutilayotgan yillik yo'qotishlar.

Kortni usuli

Robert Kortni tomonidan ishlab chiqilgan ushbu usul ALE usuliga o'xshash bo'lib, quyidagi formulaga asoslanadi:

$$R = P \times C$$

Bu yerda: R — xavf miqdori; P — ma'lum yildagi hodisalarning sodir bo'lish ehtimoli; C — bitta hodisa natijasida yo'qotishlar miqdori. Kortni usuli tahdidlarning 5 ta umumiy guruhini ajratadi: ma'lumotlarning tasodifiy o'zgarishi, ma'lumotlarning tasodifiy o'chirilishi, ma'lumotlarni qasddan oshkor qilish, ma'lumotlarni ataylab o'zgartirish va ma'lumotlarni ataylab yo'q qilish.

Monte-Karlo simulyatsiyasi. Monte-Karlo usuli tasodifiy jarayonlarni modellashtirish orqali xavflarni baholaydi. Ushbu usulda minglab simulyatsiya o'tkaziladi va har bir simulyatsiyada turli parametrlar tasodifiy qiymatlar oladi. Natijada xavfning ehtimollik taqsimoti olinadi, bu esa ALE kabi aniq raqamga qaraganda kengroq ma'lumot beradi. Monte-Karlo usulining asosiy afzalligi — u xavfning butun ehtimollik taqsimotini ko'rsatadi, ya'ni eng yomon, eng yaxshi va eng ehtimoliy stsenariylarni aniqlash imkonini beradi. Masalan, tashkilot uchun 95% ishonch darajasida maksimal yo'qotishlar miqdorini hisoblash mumkin.

Monte-Karlo simulyatsiyasini amalga oshirish uchun quyidagi bosqichlar bajariladi: dastlab, har bir parametr uchun ehtimollik taqsimoti aniqlanadi (normal, eksponentsial, uniform va boshqalar); keyin, minglab (odatda 10,000 yoki undan ko'p) simulyatsiya o'tkaziladi; har bir simulyatsiyada parametrlar belgilangan

taqsimotdan tasodifiy qiymat oladi; natijalar to'planadi va umumiy xavf taqsimoti quriladi. Ushbu usul bank tizimlari, sug'urta sohasida va yirik axborot texnologiyalari loyihalarida keng qo'llaniladi.

ISRAM usuli. ISRAM (Information Security Risk Analysis Method) — axborot xavfsizligi xavflarini tahlil qilish usuli bo'lib, so'rovnomalar yordamida ma'lumotlar to'plash va ularni statistik qayta ishlashga asoslangan. Ushbu usulda tahdid ehtimoli va ta'siri maxsus ishlab chiqilgan so'rovnomalar orqali aniqlanadi.

Qiyosiy tahlil mezonlari. Usullarni qiyoslash uchun quyidagi mezonlar belgilandi: (1) aniqlik darajasi; (2) qo'llanilish qulayligi; (3) zarur ma'lumotlar hajmi; (4) natijalarning tushunarlilik darajasi; (5) xarajatlar va vaqt sarfi; (6) amaliy qo'llanilish imkoniyati.

Natijalar. Tadqiqot natijasida to'rtta statistik usulning qiyosiy tahlili amalga oshirildi. Quyidagi jadvalda usullarning asosiy xarakteristikalarini keltirilgan:

1-jadval. Statistik usullarning qiyosiy tahlili

Mezon	ALE	Kortni	Monte-Karlo	ISRAM
Aniqlik darajasi	O'rta	O'rta	Yuqori	O'rta-past
Qo'llanish qulayligi	O'rta	Yuqori	Past	Yuqori
Zarur ma'lumotlar	Ko'p	O'rta	Juda ko'p	O'rta
Natijalar tushunarlilik	Yuqori	Yuqori	O'rta	Yuqori
Xarajat va vaqt	O'rta	Past	Yuqori	Past
Amaliy qo'llanish	Keng	Keng	Cheklangan	O'rta

Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, ALE usuli eng keng tarqalgan va amalda eng ko'p qo'llaniladigan usul hisoblanadi. Uning asosiy afzalligi – natijalar pul ko'rinishida ifodalanib, boshqaruv qarorlarini qabul qilishda qulay. ALE usulida xavflar moliyaviy yo'qotishlar ustuvorligiga muvofiq tartibga solinadi va axborot xavfsizligiga investitsiyalarni qaytarish (ROSI) ko'rsatkichini hisoblash imkonini beradi.

Kortni usuli ALE usuliga o'xshash, ammo soddaroq formuladan foydalanadi. U AQSh milliy institutlari tomonidan xavflarni rasmiy tahlil qilish usuli sifatida qabul qilingan va amaliyotda keng qo'llaniladi. Tahdidlarni 5 ta guruhga tasniflash imkoniyati usulning amaliy qulayligini oshiradi.

Monte-Karlo simulyatsiyasi eng yuqori aniqlik darajasiga ega, chunki u xavfning ehtimollik taqsimotini to'liq modellashtiradi. Biroq u katta hajmdagi dastlabki ma'lumotlarni va maxsus dasturiy ta'minotni talab qiladi, shuning uchun amaliy qo'llanilishi cheklangan.

ISRAM usuli so'rovnomalarga asoslanganligi sababli, ma'lumotlarni to'plash oson, ammo natijalarning aniqlik darajasi sub'ektiv baholashlarga bog'liq. U kichik va o'rta tashkilotlar uchun qulay.

Usullarning amaliy qo'llanilishini tahlil qilganda, ALE va Kortni usullari ko'plab xalqaro standartlarda (ISO 27005, NIST SP 800-30) tavsiya etilgan. ALE usulidan foydalanish uchun quyidagi ko'rsatkichlar zarur: aktivning haqiqiy qiymati, tahdidning yillik sodir bo'lish chastotasi va tahdid amalga oshganda aktivga yetkaziladigan zarar foizi. Ushbu ko'rsatkichlarni to'plash va aniqlash jarayoni ko'p vaqt va resurs talab qiladi, ammo natijada olingan ma'lumotlar boshqaruv qarorlarini qabul qilishda muhim asos bo'lib xizmat qiladi.

Xavflarni boshqarish jarayonining ketma-ket bosqichlarini ko'rib chiqsak, birinchi bosqichda axborot tizimi resurslarini aniqlash va tasniflash amalga oshiriladi. Ikkinchi bosqichda tahdidlarni identifikatsiyalash (Kortni usuli bo'yicha 5 ta tahdid guruhiga tasniflash) jarayoni o'tkaziladi. Uchinchi bosqichda xavfni baholash formulalar yordamida aniqlanadi. To'rtinchi bosqichda boshqaruv mexanizmlari ishlab chiqiladi (oldini oluvchi, topuvchi yoki tuzatuvchi). Beshinchi bosqichda ROI ko'rsatkichidan foydalangan holda iqtisodiy rentabellik baholanadi.

ALE asosida axborot xavfsizligiga investitsiyalar daromadlilikini (ROSI) hisoblash mumkin:

$$ROSI = (RE \times RM - SC) / SC$$

Bu yerda: RE — xavfga chalinish ta'siri; RM — xavfni minimallashtirish; SC — axborot xavfsizligi xarajatlari.

Muhokama. Tadqiqot natijalarini tahlil qilganda, axborot xavfsizligi xavflarini baholashda bitta universal usul mavjud emasligini ta'kidlash lozim. Har bir usulning o'ziga xos afzalliklari va kamchiliklari mavjud bo'lib, tashkilot o'z ehtiyojlari va imkoniyatlariga qarab mos usulni tanlashi kerak. Ushbu xulosa xalqaro amaliyotda ham tasdiqlangan – aksariyat tashkilotlar bir nechta usulni birgalikda qo'llaydi.

ALE usuli katta tashkilotlar uchun eng mos hisoblanadi, chunki u xavflarni pul ko'rinishida ifodalaydi va boshqaruv qarorlarini qabul qilishda qulay. Biroq ushbu usulda dastlabki ma'lumotlarni (aktiv qiymati, ta'sir omili, yillik sodir bo'lish chastotasi) aniq aniqlash qiyinchilik tug'dirishi mumkin. Bishop (2019) va

Pfleeger (2019) tadqiqotlari ham ushbu muammoni ta'kidlagan. Kamdan-kam hollarda axborot xavfsizligi xavflarini baholovchilar ushbu muammoni hech qanday xato va muammosiz hal qilish uchun ishonchli ma'lumotlarga ega bo'ladilar. Bundan tashqari, tashkilotning ba'zi qimmatli resurslari uchun yo'qotishlar miqdorini aniq aniqlash qiyin, masalan, maxfiy ma'lumotlarning tarqalishiga tegishli zarar miqdorini aniqlash murakkab jarayon hisoblanadi.

Kortni usuli ALE usuliga nisbatan soddaroq va tez qo'llanilishi mumkin, shuning uchun u dastlabki baholash bosqichida foydali. Ammo uning aniqlik darajasi ALE usuliga qaraganda past bo'lishi mumkin. Ushbu usulning muhim afzalligi shundaki, u AQSh milliy institutlari tomonidan xavflarni rasmiy tahlil qilish usuli sifatida qabul qilingan va bu uning ishonchliligini oshiradi. Tahdidlarni 5 ta guruhga (ma'lumotlarning tasodifiy o'zgarishi, tasodifiy o'chirilishi, qasddan oshkor qilish, ataylab o'zgartirish va ataylab yo'q qilish) tasniflash imkoniyati usulning amaliy qulayligini sezilarli oshiradi.

Monte-Karlo simulyatsiyasi eng yuqori aniqlikni ta'minlaydi, ammo uning murakkabligi va qimmatligi tufayli faqat katta va muhim loyihalarda qo'llanilishi maqsadga muvofiq. Jones va Jones (2017) ta'kidlaganidek, bu usul ko'pincha moliya va sug'urta sohalarida keng qo'llaniladi. Xalqaro amaliyot shuni ko'rsatadiki, Monte-Karlo simulyatsiyasi kvant hisoblash rivojlanishi va sun'iy intellekt texnologiyalarining keng tarqalishi sharoitida yanada muhim ahamiyat kasb etmoqda.

ISRAM usuli kichik tashkilotlar uchun amaliy va tejamkor yechim bo'lib, maxsus texnik bilim talab qilmaydi. Biroq, natijalarning sub'ektivligi uning asosiy kamchiligi hisoblanadi. So'rovnomalar yordamida ma'lumotlar to'plash jarayonida respondentlarning subyektiv fikrlari natijalarning aniqligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Investitsiyalar samaradorligini baholash nuqtai nazaridan, ALE usuli eng qulay hisoblanadi, chunki u ROI (Return on Investment) va ROSI (Return on Security Investment) ko'rsatkichlarini hisoblash imkonini beradi. Bu ko'rsatkichlar tashkilot rahbariyatiga axborot xavfsizligiga sarflanayotgan mablag'larning oqilona ekanligini asoslashda muhim dalil bo'lib xizmat qiladi.

Tadqiqotning cheklavlari sifatida quyidagilarni ta'kidlash mumkin: birinchidan, usullarning amaliy sinovlari cheklangan sonda tashkilotlarda o'tkazilgan; ikkinchidan, usullarning samaradorligini baholashda faqat nazariy tahlil va adabiyotlar sharhi qo'llanilgan; uchinchidan, yangi paydo bo'layotgan usullar (masalan, FAIR – Factor Analysis of Information Risk) tadqiqotga kiritilmagan. Kelajakda turli soha tashkilotlarida amaliy tajribalar o'tkazilsa va yangi zamonaviy usullar ham qiyosiy tahlilga kiritilsa, yanada ishonchli va keng qamrovli natijalar olinishi mumkin.

Xulosa. Tadqiqot natijalaridan quyidagi xulosalarga kelindi:

1. ALE usuli axborot xavfsizligi xavflarini baholashda eng keng tarqalgan va amaliy jihatdan eng qulay usul hisoblanadi. U xavflarni pul ko'rinishida ifodalaydi va boshqaruv qarorlarini qabul qilishda samarali. ALE formulalari ($SLE = EF \times AV$, $ALE = SLE \times ARO$) yordamida har bir tahdid uchun kutilayotgan yillik moliyaviy yo'qotishlarni aniq hisoblash mumkin. Ushbu usul xalqaro standartlarda (ISO 27005, NIST SP 800-30) tavsiya etilgan.

2. Kortni usuli ALE usulining soddalashtirilgan varianti bo'lib, dastlabki baholash bosqichida samarali qo'llanilishi mumkin. Uning asosiy afzalligi – tahdidlarni 5 ta guruhga tasniflash imkoniyati va formulalarning soddaligi ($R = P \times C$). AQSh milliy institutlari tomonidan rasmiy usul sifatida qabul qilingan.

3. Monte-Karlo simulyatsiyasi eng yuqori aniqlikni ta'minlaydi, chunki u xavfning butun ehtimollik taqsimotini modellashtiradi. Ammo murakkabligi, katta hajmdagi dastlabki ma'lumotlar va maxsus dasturiy ta'minot talabi tufayli faqat katta va muhim loyihalarda, xususan, moliya va sug'urta sohalarida qo'llanilishi tavsiya etiladi.

4. ISRAM usuli kichik va o'rta tashkilotlar uchun tejamkor va qulay yechim hisoblanadi. So'rovnomalar yordamida ma'lumotlar to'plash oson, ammo natijalarning subyektivligi hisobga olinishi kerak.

5. Tashkilotlarga o'z ehtiyojlari va imkoniyatlariga qarab bir nechta usulni birgalikda qo'llash tavsiya etiladi. Masalan, dastlabki bosqichda Kortni usulidan, batafsil tahlil uchun ALE usulidan, katta loyihalar uchun esa Monte-Karlo simulyatsiyasidan foydalanish maqsadga muvofiq.

6. Kelajakdagi tadqiqotlarda FAIR (Factor Analysis of Information Risk) kabi yangi usullarni ham qiyosiy tahlilga kiritish, turli soha tashkilotlarida amaliy tajribalar o'tkazish va sun'iy intellekt texnologiyalarini xavflarni baholash jarayoniga integratsiya qilish istiqbolli yo'nalishlar hisoblanadi.

ADABIYOTLAR:

1. Santos-Olmo, A., Sánchez, L.E., Rosado, D.G. et al. (2024). Towards an integrated risk analysis security framework according to a systematic analysis of existing proposals. *Frontiers of Computer Science*, 18, 183808.
2. Ekstedt, M., Afzal, Z., Mukherjee, P. et al. (2023). Yet another cybersecurity risk assessment framework. *International Journal of Information Security*, 22, 1713–1729.
3. Suroso, J.S., Wahjudi, S., & Aprianti, N. (2022). Information Security Risk Assessment Using Situational Awareness Frameworks and Application Tools. *Risks*, 10(8), 165.
4. Camacho, D. et al. (2025). A cybersecurity risk analysis framework for systems with artificial intelligence components. *International Transactions in Operational Research*, 70049.
5. Ardebili, A.A., Padoano, E. et al. (2024). Risk Assessment for Cyber Resilience of Critical Infrastructures: Methods, Governance, and Standards. *Applied Sciences*, 14(24), 11807.
6. Sbriz, L. (2024). Adding Value With Risk Based Information Security. *ISACA Journal*, 5.
7. Al-Dhaqm, A. et al. (2024). Information Security Risk Assessment Methods in Cloud Computing: Comprehensive Review. *Journal of Computer Information Systems*, Taylor & Francis.
8. Hubbard, D.W., & Seiersen, R. (2023). *How to Measure Anything in Cybersecurity Risk* (2nd ed.). Wiley.
9. Freund, J., & Jones, J. (2024). *Measuring and Managing Information Risk: A FAIR Approach* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
10. NIST (2024). *NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0*. National Institute of Standards and Technology.
11. ISO/IEC 27005:2022. *Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection — Guidance on Managing Information Security Risks*. ISO.
12. Whitman, M.E., & Mattord, H.J. (2022). *Principles of Information Security* (7th ed.). Cengage Learning.

DIGITALIZATION AND THE EXTENSIVE INTEGRATION OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Fozilova Maxina Adashevna,

Kimyo International University in Tashkent,

Samarkand branch

makhinafozilova@gmail.com

Abstract. This article deals with digitalization and the extensive integration of information and communication technologies (ICT) as a transformative force in contemporary educational systems. The research examines the theoretical foundations, practical applications, and pedagogical implications of ICT-driven educational environments across different levels of education. Particular attention is paid to the role of digital technologies in enhancing flexibility, accessibility, and learner-centeredness, as well as in supporting innovative instructional models. Using a systematic analysis of recent scholarly literature and selected educational practices, the study identifies key trends, challenges, and opportunities associated with digital transformation in education.

Keywords: digitalization; information and communication technologies (ICT); educational modernization; digital learning environments; innovative instructional models; learner-centered education; digital competence.

RAQAMLASHTIRISH VA AXBOROT-KOMMUNIKATSIYA TEXNOLOGIYALARINING KENG KO'LAMLI INTEGRATSIYASI

Annotatsiya. Ushbu maqola zamonaviy ta'lim tizimlarida raqamlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining (AKT) keng joriy etilishini muhim transformatsion omil sifatida ko'rib chiqadi. Tadqiqotda AKT asosidagi ta'lim muhitlarining nazariy asoslari, amaliy qo'llanilishi hamda pedagogik ahamiyati ta'limning turli bosqichlari kesimida tahlil qilinadi. Shuningdek, raqamli texnologiyalarning ta'lim jarayonining moslashuvchanligi, ochiqligi va o'quvchi markazlilikini oshirishdagi roli, hamda innovatsion o'qitish modellarini qo'llab-quvvatlashdagi ahamiyatiga alohida e'tibor qaratiladi. So'nggi ilmiy adabiyotlar va ayrim ta'lim amaliyotlarini tizimli tahlil qilish asosida tadqiqot ta'limdagi raqamli transformatsiya bilan bog'liq asosiy tendensiyalar, muammolar va imkoniyatlarni aniqlaydi.

Kalit so'zlar: raqamlashtirish; axborot-kommunikatsiya texnologiyalari (AKT); ta'limni modernizatsiya qilish; raqamli ta'lim muhitlari; innovatsion o'qitish modellari; o'quvchi markazli ta'lim; raqamli kompetensiya.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И РАСШИРЕННАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. Данная статья посвящена цифровизации и широкому внедрению информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) как трансформационной силы в современных образовательных системах. В исследовании рассматриваются теоретические основы, практическое применение и педагогические последствия образовательных сред, основанных на использовании ИКТ, на различных уровнях образования. Особое внимание уделяется роли цифровых технологий в повышении гибкости, доступности и ориентированности обучения на обучающегося, а также в поддержке инновационных моделей преподавания. На основе системного анализа современной научной литературы и отдельных образовательных практик в работе выявляются основные тенденции, проблемы и возможности, связанные с цифровой трансформацией образования.

Ключевые слова: цифровизация; информационно-коммуникационные технологии (ИКТ); модернизация образования; цифровые образовательные среды; инновационные модели обучения; личностно-ориентированное обучение; цифровая компетентность.

Introduction. The urgency of this study is considered the rapid digital transformation of society and the growing demand for flexible, accessible, and personalized educational models. As digital technologies increasingly shape economic, social, and cultural processes, educational institutions are required to adapt

teaching and learning practices to meet contemporary challenges. Despite the widespread adoption of ICT, significant gaps remain in understanding how digital tools can be systematically and pedagogically integrated into educational systems.

In recent years, blended learning models have been increasingly employed in educational practice. This trend can be explained by their high potential for learner-centered instruction, as well as by their capacity to integrate technologies of formal, non-formal, and informal learning. Such integration enables educators to select optimal instructional solutions depending on specific educational objectives and contextual conditions within a given learning environment.

Literature review. The theoretical foundations of blended learning have a long research history dating back to the early twentieth century. In the 1920s, American scholars Bonk and Graham proposed an approach that combined face-to-face instruction with computer-mediated learning, thereby exploring the possibilities of the simultaneous use of traditional and electronic educational technologies [5]. As early as the 1920s and 1930s, American schools employed electronic correspondence to facilitate communication between teachers and students, while by the 1970s this mode of interaction had become common practice in many open universities worldwide [8]. In essence, blended learning represents a form of integration between instruction and self-directed learning, shaped by educational objectives and the practical feasibility of their implementation.

The complexity of blended learning as an educational technology accounts for the diversity of terminological interpretations used to define its essence and key characteristics. In scholarly discourse, it is described as mixed-mode, hybrid, or web-enhanced learning, each term emphasizing the combination of traditional classroom-based instruction with electronic and digital learning formats aimed at achieving desired educational outcomes. Blended learning is commonly understood as a flexible instructional approach that combines in-class teaching with online activities, capitalizing on the advantages of digital training and assessment tasks while incorporating additional methods designed to enhance student learning outcomes and optimize educational costs [4].

Given the multiplicity of possible combinations of instructional forms, blended learning constitutes a dynamic and promising field for educational research, requiring the joint efforts of both theorists and practitioners. Researchers examine various integrative approaches within this context, defining blended learning as:

- *the integration of different modes of learning;*
- *the combination of diverse instructional methods;*
- *the synthesis of face-to-face interaction with online learning environments* [7, p. 39].

Thus, blending may occur at both a macro level—relating to types of learning and a micro level—focusing on the integration of forms, methods, and organizational strategies. Accordingly, multiple formats of blending are distinguished, including individual and whole-class instruction; frontal and group-based learning; face-to-face and distance education; organized and autonomous learning; as well as standardized and personalized, learner-centered approaches.

Significant variation is also observed in the interpretation of the concept of blended learning within domestic research. For instance, S.D.Kalinina defines blended learning as the internalization of distance educational technologies into the system of traditional instruction, including the use of network-based information resources, databases, electronic libraries, email communication, institutional learning management systems, electronic courses, massive open online courses (MOOCs), and webinar services [9, p. 38]. E.A.Kornilova conceptualizes blended learning as a purposeful process of acquiring knowledge, skills, and competencies through the integration of in-class and extracurricular learning activities, based on the complementary use of traditional, electronic, distance, and mobile learning technologies. A defining feature of this approach is the learner's control over time, place, learning pathway, and pace of study [2, p. 112].

An analysis of these definitions demonstrates that scholars, depending on their research priorities, emphasize different types of integrative processes and their semantic content. In many cases, priority is given to technological and technical aspects of combining traditional and innovative forms of education, while comparatively less attention is paid to goal orientation and criteria for the pedagogical validity of such integration.

Among the most widely recognized blended learning models are the following.

The Face-to-Face Driver model involves the delivery of most instructional content through direct teacher–student interaction, with online resources serving as supplementary components, often for small groups of learners.

The Flex model relies primarily on online content delivery, while instructors remain available on-site to provide guidance and consultation as needed. Learning in this model is largely self-directed and practice-oriented within a digital environment.

The Rotation model allows students to alternate between different learning stations according to a predetermined schedule, including online activities and face-to-face instruction.

The Online Lab model is designed for learners who are unable to attend regular classes, enabling them to study entirely online while completing practical tasks in specialized laboratories.

The Self-Blend model offers students the opportunity to supplement institutional curricula with online courses provided by other educational organizations.

The Online Driver model ensures maximum flexibility and independence, as learners engage with instructional content remotely through digital platforms [3].

It is important to emphasize that the key issue does not lie in conducting a purely comparative evaluation of blended learning models to identify a single most effective format. All models demonstrate a high level of effectiveness under appropriate conditions and possess substantial potential for further development in contemporary educational practice. In this regard, the position articulated by Donald Clark, researcher and president of the educational company Epic Group plc, is particularly noteworthy. He argues that blended learning is grounded in foundational concepts that represent a fundamentally new type of educational system; therefore, its understanding requires moving beyond traditional interpretations of both teaching and curricula [6].

Consequently, blended learning should not be perceived as a mechanical or unsystematic combination of conventional and digital instructional forms. Instead, blending strategies must be embedded within a coherent conceptual framework and aligned with clearly defined quality criteria and indicators. One of the core system-forming criteria is learner-centeredness, which evaluates educational effectiveness through indicators such as the development of individualized learning pathways and the learner's ability to select optimal methods for personal and professional self-realization.

Discussion. Learner-centeredness primarily implies variability in instruction and the capacity to accommodate individual priorities and educational needs. Such variability is traditionally achieved through diverse instructional designs, combinations of structural components, and configurations oriented toward anticipated learning outcomes. The key challenge lies in ensuring that participants in the educational process are prepared to comprehend the underlying nature of these formats, including their goals and technological distinctions, in order to independently construct optimal models of learning activities and their integration in accordance with specific tasks and educational contexts.

This position is particularly relevant in the formation of meta-disciplinary competencies, including information and communication competence, analytical and reflective competence, and system-forming competence—commonly conceptualized as the ability to learn. These competencies encompass the capacity to manage knowledge, process information, and work with educational texts. The primary agent in their development is the educator, who deliberately engages in continuous professional development.

Collectively, these competencies ensure the sustainability of educational processes and reflect a modern teacher's readiness for lifelong learning. Central within this framework is the educator's capacity for self-regulation, manifested in the ability to design and manage the educational process along an individualized trajectory in accordance with learner-centered principles.

From this perspective, blended learning demonstrates significant potential for implementing the foundations of competency-based and learner-centered education. It is characterized by:

(a) flexibility in instructional design and access to a wide range of digital devices and tools unavailable within traditional educational systems;

(b) variability of educational models that enable shifts between types of learning activities, support the principle of learner choice, and facilitate the identification of optimal conditions for addressing specific instructional tasks;

(c) the ability to regulate learning modes by considering individual workload distribution, thereby accounting for intellectual, psychological, and physical characteristics of each participant when designing personalized learning programs and monitoring their effectiveness.

Based on the degree of learner-centeredness, models of blended learning can be provisionally classified according to the level and nature of management activity within their organizational structure. Research indicates that a key criterion in this context is the balance between external instructional management and learner self-management, which governs goal setting, selection of informational and technological support, implementation adjustments, and outcome evaluation.

Two diametrically opposed models of blended learning organization can be identified. The first model formally incorporates blended learning by alternating face-to-face and distance formats; however, in substance, it adheres to traditional instructional principles grounded in subject–object relationships. The second model is designed within a learner-centered paradigm and is based on interaction as its core conceptual and technological foundation.

The fundamental distinction between these models lies in the nature of management activity specifically, the proportion between instructor-led control and learner self-regulation. The traditional model presupposes total instructional control, wherein the teacher independently defines learning objectives, determines instructional formats, and evaluates outcomes against a single standardized benchmark, often disregarding individual learner characteristics. In contrast, the opposing model prioritizes self-management, which depends on learner activity, subjectivity, awareness, and dominant motivational factors.

For instance, within postgraduate education, teachers are typically motivated to purposefully enhance their professional competence by integrating opportunities for formal, non-formal, and informal learning. This orientation is reflected in blended learning formats and in various combinations of face-to-face and distance education. These formats may range from elementary models—where instructors propose learning structures subject to learner modification—to optimal models, such as collaborative syllabus design that actively incorporates learners' interests and needs, thereby ensuring learner-centeredness.

Between elementary and optimal models exists a wide spectrum of intermediate variants distinguished by differing levels of learner autonomy. The effectiveness of these models depends on the readiness of both learners and instructors to operate within a learner-centered framework. This readiness can be fostered through learner participation at all instructional stages, including preliminary design and organizational tasks such as curriculum analysis, identification of professional development priorities, program modification, and the selection of effective traditional and innovative instructional methods for both face-to-face and distance learning.

Consequently, the transition from traditional to learner-centered education is dynamic and contingent upon learners' preparedness for self-regulation and self-development within formal education. Under such conditions, learners become active participants who define individual trajectories of professional growth while articulating their educational needs to institutional management structures that regulate and support the learning process.

Thus, the learner functions as a system-forming component of blended learning and, more importantly, as the principal agent of competence development beyond formal education, within professional practice. The ability to select and adapt learning formats to personal needs emerges through organized instruction and fosters integration into self-educational systems. The flexibility of blended learning and the capacity to design responsive educational formats enhance integrative competence, particularly the ability to learn and self-regulate educational activity.

Ultimately, this discussion emphasizes the central role of teacher self-education, which remains the highest value across all instructional formats. Beyond ensuring continuity, self-education serves as a linking mechanism between different levels and types of educational activity. Therefore, the development of self-educational capacity should be regarded as both a core objective and a criterion for evaluating the effectiveness of educational systems at all levels, as it constitutes the primary mechanism for lifelong learning.

Based on the above considerations, several positions defining the essence and conditions for the practical implementation of blended learning in professional development have been identified:

Blended learning should not be treated as an end in itself; rather, it must be examined within the context of innovative trends in professional education and aligned with contemporary quality standards. Its effectiveness should be assessed through indicators of professional competence development and readiness for continued self-education.

Blended learning should be implemented systematically rather than episodically, within a coherent educational system characterized by conceptual integrity. Accordingly, blended formats must be institutionally integrated and supported by appropriate content and technological frameworks.

The transition to blended learning is complex and challenging due to insufficient readiness among educational stakeholders, including instructors. Therefore, emphasis should be placed on a gradual transition beginning with simple integration models and progressing toward more advanced forms, while avoiding formalism and superficial adoption driven by transient trends.

In postgraduate education, the adoption of blended learning requires preparatory measures encompassing both theoretical components—such as principles, structures, and technologies of blended

learning—and practical components grounded in the analysis of contemporary best practices and educators' own professional experience, viewed through the lens of blended learning potential.

Conclusion. It is essential to recognize that the specificity of a teacher's professional development within the system of postgraduate education lies in the requirement that the application of blended learning models presupposes the subsequent transfer of acquired theoretical knowledge and practical experience into the teacher's professional practice. In particular, the competencies developed during postgraduate training should be effectively implemented in the organization of blended learning environments for school students. If the theoretical foundations of blended learning are not directly integrated into the practical organization of instructional activities within teacher training institutions, the result is the persistence of the traditional theory–practice gap, accompanied by predictable contradictions and negative pedagogical outcomes.

REFERENCES:

1. Омарова К. А., Исаева Л. М., Абубакаров М. Смешанное обучение интеграция онлайн и офлайн форматов-исследование эффективных моделей сочетания традиционных и цифровых методов обучения // *Economical and humanitarical researches of the regions*. – С. 70.
2. Kornilova, E.A. Blended Learning as a Means of Implementing a System-Activity Approach in School / E.A. Kornilova, A.A. Strizhakov // *Bulletin of Moscow State Regional University*. - 2016. - No. 4. - P. 110-118.
3. *Models of Blended Learning*. - URL:<http://www.dreambox.com/blog/6-models-blended-learning>.
4. Benandos, E.A. Blended - learning pedagogical model for teaching and learning EFL successfully through an online interactive multimedia environment // *CALICO Journal*. – 2006. – No. 23 (3). – Pr. 533-550.
5. Bonk, C.J., & Graham, C.R. *The handbook of blended learning environments: Global perspectives, local designs*. San Francisco: Jossey-Bass/Pfeiffer, 2006.–585 rub.
6. Clark, D. *Blended Learning: An Epic White Paper per [electronic resource]* / Clark D // Epic Group plc. – 2003. – 44 p.
7. Curtis, J. Bonk *The Handbook of Blended Learning: Global Perspectives, Local Designs* / Curtis J. Bonk, Charles R. Graham // Pfeiffer. – 2006.
8. Duhaney D. *Technology and higher education: Challenges in the halls of academy* // *International Journal of Instructional Media*. — 2005, Vol.32, No. 1– P.7-15.
9. Kalinina, S.D. *Conditions for the Effective Use of Webinars in the University Educational Process* / S.D. Kalinina // *Humanities and Education*. - No. 3 (23). - 2015. - P. 37-42.
10. Sarsenbaeva Z. *A Systematic comparison of selected texts by d. mitchell* // *Interpretation and researches*.–2024.
11. Sarsenbaeva Z. *Descriptions of imagery, symbolism, and non-realistic elements* // *Conference Proceedings: Fostering Your Research Spirit*. – 2024. – С. 409-414.
12. Сарсенбаева З. *Analysis of images and symbols in english non-realistic works* // *Ренессанс в парадигме новаций образования и технологий в XXI веке*. – 2023. – Т. 1. – №. 1. – С. 229-232.
13. Сарсенбаева З. *Модернизм в узбекской литературе и интерпретация образов* // *Зарубежная лингвистика и лингводидактика*. – 2024. – Т. 2. – №. 1. – С. 193-199.
14. Zoya S. *Literary analysis of david mitchell's works in english literature* // *Talqin va tadqiqotlar ilmiy-uslubiy jurnali*. – 2024. – Т. 2. – №. 41. – С. 11-19.
15. Zoya S. *Literary analysis of ulugbek hamdamov's works in uzbek literature* // *Talqin va tadqiqotlar ilmiy-uslubiy jurnali*. – 2024. – Т. 2. – №. 41. – С. 20-25.

METROLOGIK TA'MINOT ORQALI ELEKTR MAHSULOTLARINING SIFATINI ANIQLASH

*Toshboboyev Shohzod Mahkam o'g'li,
"O'bekiston ilmiy-sinov va sifat nazorati markazi"
davlat muassasasi tayanch doktranti
shahzodshahriyor1992202120@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu maqolada qarshilikli elektr pech (Model: KT-TF12, seriya: 25042108) misolida elektr qurilmalarning sifat ko'rsatkichlarini aniqlash masalalari ko'rib chiqiladi. Tadqiqotda asbobning elektr parametrlarini, xususan, iste'mol quvvati, tok kuchi, kuchlanish barqarorligi va energiya samaradorligini baholash metodlari tahlil etiladi. Shuningdek, metrologik ta'minotning ahamiyati, ya'ni o'lchash vositalarining aniqligi, kalibrlanishi va standartlarga muvofiqligi orqali olingan natijalarning ishonchligini ta'minlash masalalari yoritiladi.

Kalit so'zlar: elektr pech, qarshilikli pech, elektr mahsulotlari sifati, metrologik ta'minot, elektr parametrlar, iste'mol quvvati, tok kuchi, kuchlanish barqarorligi, energiya samaradorligi.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы определения показателей качества электрических устройств на примере печи электрического сопротивления (модель KT-TF12, серия 25042108). В исследовании анализируются методы оценки электрических параметров прибора, в частности потребляемой мощности, силы тока, стабильности напряжения и энергоэффективности. Также освещается значение метрологического обеспечения, то есть обеспечение достоверности результатов измерений за счёт точности измерительных средств, их калибровки и соответствия стандартам.

Ключевые слова: Электрическая печь, печь сопротивления, качество электрической продукции, метрологическое обеспечение, электрические параметры, потребляемая мощность, сила тока, стабильность напряжения, энергоэффективность.

DETERMINATION OF ELECTRICAL PRODUCT QUALITY THROUGH METROLOGICAL SUPPORT

Abstract. This article examines the issues of determining the quality indicators of electrical devices using the example of an electric resistance furnace (model KT-TF12, serial number 25042108). The study analyzes methods for evaluating the electrical parameters of the device, in particular power consumption, current, voltage stability, and energy efficiency. It also highlights the importance of metrological support, namely ensuring the reliability of measurement results through the accuracy of measuring instruments, their calibration, and compliance with standards.

Keywords: Electric furnace, resistance furnace, quality of electrical products, metrological support, electrical parameters, power consumption, current, voltage stability, energy efficiency.

Kirish. Bugungi kunda elektr mahsulotlari inson faoliyatining deyarli barcha sohalarida muhim ahamiyatga ega. Ular nafaqat kundalik hayotimizni qulaylashtiradi, balki sanoat, tibbiyot, laboratoriyalar va ilmiy tadqiqotlarda ham keng qo'llaniladi. Shu sababli, elektr mahsulotlarining sifati, ishlash barqarorligi va xavfsizligi foydalanuvchi uchun bevosita ahamiyatga ega bo'lib, ishlab chiqaruvchilar va iste'molchilar uchun muhim talab hisoblanadi. Ayniqsa, qarshilikli elektr pechlar kabi yuqori harorat va energiya iste'moli bilan ishlovchi qurilmalar uchun xavfsizlik va sifat ko'rsatkichlarini ta'minlash alohida ahamiyatga ega.

Elektr pechlar (Model: KT-TF12, Seriya: 25042108) kabi qurilmalar bir qancha texnik parametrlar asosida baholanadi. Ularning sifat ko'rsatkichlarini aniqlashda metrologik ta'minotning roli juda katta. Metrologik ta'minot – bu o'lchash vositalarining aniqligi, kalibrlanishi, normativ hujjatlar va xalqaro standartlarga muvofiqligi orqali mahsulot sifatini ishonchli va obyektiv baholash jarayonidir. Mazkur jarayon

elektr mahsulotlarining ekspluatatsion xavfsizligini, energiya samaradorligini va foydalanuvchi xavfsizligini ta'minlashga xizmat qiladi.

Elektr pechning texnik ko'rsatkichlari bir nechta asosiy yo'nalishlarda baholanadi. Iste'mol qilinadigan quvvat va tok kuchi pechning elektr energiyasini samarali ishlatishini belgilaydi. Maxsus standartlarga (ГОСТ IEC 61010-1-2014) muvofiq, maksimal nominal quvvat vatlarda (faol quvvat) yoki volt-amperlarda (ko'rinma quvvat) va barcha ulangan yordamchi uskuna yoki ichki modullar bilan birga maksimal nominal kirish toki bilan belgilanadi. Bu parametrlar pechning energiya samaradorligini baholash va elektr tarmoqlariga yukni aniqlash uchun muhimdir.

Bundan tashqari, markirovka ham sifat ko'rsatkichlarining ajralmas qismi hisoblanadi. Markirovka foydalanuvchi uchun oson o'qiladigan, aniq va farqlanadigan bo'lishi, shuningdek, tozalash vositalari ta'siriga chidamli bo'lishi kerak. Markirovka foydalanuvchini xavfsizlik qoidalari, maksimal quvvat va ishlash shartlari haqida xabardor qiladi.

Elektr toki urishidan himoya – elektr pech xavfsizligining eng muhim omillaridan biridir. Himoya kuchlanish ostidagi qismlardan izolyatsiya orqali ta'minlanadi, shuningdek, normal ishlash sharoitida va yagona nosozlik yuzaga kelgan holatlarda foydalanuvchi uchun xavf tug'dirmasligi lozim. Shu bilan birga, izolyatsiyaning elektr chidamliligi ham muhim parametrdir. Sinovlar davomida bo'shliq yoki qattiq izolyatsiyada yorilish yuz bermasligi ta'minlanishi kerak, bu esa mahsulotning uzoq muddatli ishlashini kafolatlaydi.

Mexanik barqarorlik va chidamlilik ham elektr pechlar sifatini baholashda muhim rol o'ynaydi. Binoning elementlariga birlashtirilgan uskuna va uskuna to'plamlari mexanik jihatdan barqaror bo'lishi, shuningdek, normal ishlash sharoitida yuz berishi mumkin bo'lgan mexanik ta'sirlar xavf tug'dirmasligi lozim. Bu talablar pechning ekspluatatsion xavfsizligini oshirish va uni uzoq muddat ishlatishda shikastlanish xavfini kamaytirishga xizmat qiladi.

Ushbu maqolada qarshilikli elektr pechlar sifatini baholashda texnik parametrlar, metrologik ta'minot va standartlarga muvofiq sinov usullarining ahamiyati batafsil yoritiladi. Tadqiqot natijalari pechlarning ishlash sifati, energiya samaradorligi va xavfsizligini oshirishga, shuningdek, foydalanuvchi xavfsizligini ta'minlashga yordam beradi. Shuningdek, maqola elektr mahsulotlarini ishlab chiqarish va sinov jarayonida sifat ko'rsatkichlarini aniqlashga qaratilgan metodologiyalarni ham o'z ichiga oladi.

Qo'llanilgan metodlar. Ushbu maqolada qo'llanilgan metodlar – qarshilikli elektr pech (Model: KT-TF12, Seriya: 25042108) sifatini baholash va uning xavfsizlik, energiya samaradorligi hamda mexanik chidamliligi ko'rsatkichlarini aniqlashga qaratilgan tizimli usullar to'plamidir.

Iste'mol qilinadigan quvvat va tokni o'lchash. Pechning maksimal nominal quvvatini va kirish tokini aniqlash uchun xalqaro standartlarga mos keladigan elektr o'lchash vositalari ishlatiladi. O'lchashlar ГОСТ IEC 61010-1-2014 ning 5.1.3-bandiga muvofiq amalga oshiriladi. Ushbu metod orqali pechning energiya samaradorligi va elektr tarmoqlariga yuk ko'rsatkichlari baholanadi. O'lchash natijalari maksimal nominal quvvat vatlarda (faol quvvat) yoki volt-amperlarda (ko'rinma quvvat) hamda barcha ulangan yordamchi uskuna yoki ichki modullar bilan birga maksimal nominal kirish tokini aniqlash imkonini beradi.

Markirovka chidamliligi va aniqligini baholash. Markirovkaning aniq va farqlanadigan bo'lishi, shuningdek, tozalash vositalariga chidamli ekanligi sinovdan o'tkaziladi. Ushbu sinov ГОСТ IEC 61010-1-2014 5.3-bandiga muvofiq amalga oshiriladi. Metod markirovkaning normal ishlatish sharoitida oson o'qiladigan va foydalanuvchi uchun qulay ekanligini aniqlashga imkon beradi.

Elektr toki urishidan himoya. Pechning foydalanuvchi uchun xavfsizligini baholashda izolyatsiya va himoya elementlari sinovdan o'tkaziladi. Sinovlar ГОСТ IEC 61010-1-2014 6.2.2 va 6.2.3-bandlariga muvofiq amalga oshiriladi. Ushbu metod yordamida pechning normal ishlash va yagona nosozlik yuzaga kelgan holatlarida foydalanuvchi uchun xavfsizligi ta'minlanganligi aniqlanadi.

Izolyatsiyaning elektr chidamliligini tekshirish. Sinov davomida bo'shliq yoki qattiq izolyatsiyada yorilish yuz bermasligi ta'minlanadi. Bu metod ГОСТ IEC 61010-1-2014 6.8.3.1 va 6.8.3.2-bandlariga muvofiq amalga oshiriladi. Sinov natijalari pechning uzoq muddatli ishlashida elektr xavfsizligini kafolatlaydi.

Mexanik barqarorlik va chidamlilikni baholash. Pech va uning uskuna to'plamlari normal ishlash sharoitida mexanik ta'sirlarga chidamliligi sinovdan o'tkaziladi. Sinovlar ГОСТ IEC 61010-1-2014 7.4 va 8.2.1-bandlariga muvofiq amalga oshiriladi. Bu metod yordamida uskuna binoning elementlariga birlashtirilgan holatda mexanik jihatdan barqarorligi, shuningdek, normal ishlash sharoitida yuz berishi mumkin bo'lgan mexanik ta'sirlardan xavfsizlikni ta'minlashi tekshiriladi.

Metrologik ta'minotning qo'llanilishi. Barcha o'lchash va sinovlar aniqligi tasdiqlangan o'lchash vositalari bilan amalga oshiriladi. Kalibrlangan asbob-uskunalar va xalqaro standartlarga mos metodologiya yordamida olingan natijalar ishonchli va takrorlanadigan bo'ladi. Shu bilan birga, metrologik ta'minot

mahsulot sifatini obyektiv baholash, ekspluatatsion xavfsizlik va energiya samaradorligini aniqlashda asosiy vosita hisoblanadi.

Ushbu metodlar orqali qarshilikli elektr pechning barcha muhim texnik ko'rsatkichlari, shu jumladan, elektr xavfsizligi, energiya samaradorligi, mexanik chidamlilik va markirovka sifati tizimli tarzda baholandi. Bu esa mahsulotning standartlarga muvofiqligini tasdiqlash va foydalanuvchi xavfsizligini ta'minlash imkonini beradi.

Olingan natijalar va ularning tahlili: Iste'mol qilinadigan quvvat va kirish tokini aniqlash sinovi.

Ushbu laboratoriya sinovi qarshilikli elektr pechning maksimal nominal quvvatini va kirish tokini aniqlash hamda ularning normativ hujjatlar talablariga muvofiqligini baholash maqsadida o'tkazildi. Sinov jarayonida uskuna barcha ulangan yordamchi qurilmalar bilan birga maksimal yuklama rejimida ishlatildi.

O'lchashlar metrologik jihatdan tasdiqlangan va kalibrlangan asboblardan yordamida amalga oshirildi. Sinov davomida dastlabki o'tish jarayonlari ta'sirini bartaraf etish uchun uskuna ishga tushirilgandan so'ng tok barqarorlashguncha (taxminan 1 daqiqa) kutildi va shundan keyin o'lchashlar olib borildi.

Sinov natijasida quyidagi asosiy parametrlar aniqlanadi: kuchlanish (U), tok (I), faol quvvat (P) va ko'rinma quvvat (S). Faol quvvat quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

bu yerda $\cos \varphi = 0.95$ – quvvat koeffitsiyenti.

Ko'rinma quvvat esa quyidagicha aniqlanadi:

$$S = U \cdot I$$

Hisoblash misoli

Biz o'lchash ishlarini bajarib quyidagi natijalari ega bo'ldik.

- $U = 220 \text{ V}$
- $I = 10 \text{ A}$
- $\cos \varphi = 0.95$

Faol quvvat:

$$P = 220 \cdot 10 \cdot 0.95 = 2090 \text{ W}$$

Ko'rinma quvvat:

$$S = 220 \cdot 10 = 2200 \text{ W}$$

O'lchash natijalarining ishonchliligini ta'minlash uchun kengaytirilgan noaniqlik hisoblandi:

$$U_{\text{kengaytirilgan}} = k \cdot u$$

bu yerda:

- $k = 2$ (95% ishonchlilik darajasi),
- $u = 20 \text{ W}$ (faraziy standart noaniqlik)

$$U = 2 \cdot 20 = 40 \text{ W}$$

Natija quyidagicha yoziladi:

$$P = 2090 \pm 40 \text{ W}$$

Olingan natijalar mahsulot pasportida (PS) ko'rsatilgan qiymatlar bilan solishtirildi. O'lchangan quvvat va tok qiymatlari ruxsat etilgan chegaradan oshmadi va uskuna normativ talablariga mos deb topiladi. Natijaga muvofiq, mahsulotning iste'mol qilinadigan quvvati uning quvvat manbayi bilan mos kelishi keldi, bu esa elektr tarmog'iga ortiqcha yuk tushishini oldini oladi va xavfsiz ishlashni ta'minlaydi. Ushbu sinov orqali elektr pechning maksimal quvvat sarfi, kirish toki va quvvat koeffitsiyenti aniqlandi. Metrologik ta'minot va $k = 2$ koeffitsiyent asosida baholash natijalarining ishonchliligini ta'minladi. Olingan natijalar asosida uskuna normativ hujjatlar talablariga muvofiqligi baholandi.

Markirovka chidamliligini aniqlash sinov usuli. Markirovkaning chidamliligini baholash sinovi uskunaning tashqi yuzasiga qo'yilgan yozuv va belgilarni normal ekspluatatsiya sharoitida saqlanish darajasini aniqlash maqsadida o'tkaziladi. Ushbu sinov GOCT IEC 61010-1-2014 standart talablariga muvofiq amalga oshirildi.

Sinov jarayonida markirovka yuzasiga ishlab chiqaruvchi tomonidan tavsiya etilgan tozalash vositasi bilan ishlov berildi. Biz tozalash vositasi ko'rsatilmagani uchun 70 % li izopropil spirti qo'lladik. Ta'sir qilish jarayoni qo'l yordamida, kuchli bosim bermasdan, namlangan doka (marli) bilan 30 soniya davomida artish orqali amalga oshiriladi.

Sinovdan so'ng markirovkaning holati vizual usulda baholadik. Bunda quyidagi mezonlar asosiy hisoblandi:

- markirovkaning aniqligi va o'qiluvchanligi saqlangan bo'lishi;

- belgilar va yozuvlar farqlanadigan holda qolishi;
- yopishtirilgan yorliqlar ajralib ketmasligi;
- yorliq chetlarining bukilishi yoki deformatsiyasi kuzatilmaslgi.

Sinov natijasida yuqoridagi talablar to'liq bajarilib, markirovka chidamliligi qoniqarli, deb baholandi va uskuna normativ hujjat talablariga mos deb topildi.

Elektr toki urishidan himoyani aniqlash bo'yicha laboratoriya sinovi. Ushbu laboratoriya sinovi elektr uskunaning foydalanuvchini elektr toki urishidan himoyalash darajasini baholash maqsadida o'tkazildi. Sinov GOCT IEC 61010-1-2014 standartining 6-bo'lim talablariga muvofiq amalga oshirildi.

Sinovdan maqsad – uskuna normal ekspluatatsiya sharoitida hamda yagona nosozlik yuzaga kelgan holatlarda foydalanuvchi uchun xavf tug'dirmasligini aniqlashdan iborat. Shuningdek, ochiq (tegish mumkin bo'lgan) qismlarda hosil bo'ladigan elektr kattaliklarining ruxsat etilgan chegaradan oshmasligi tekshirildi.

Sinov quyidagi bosqichlar asosida amalga oshirildi:

- uskuna tarkibidagi foydalanuvchi uchun ochiq (tegish mumkin bo'lgan) qismlar aniqlandi;
- ochiq qismlar bilan yer o'rtasida hamda o'zaro yaqin (1,8 m gacha) joylashgan qismlar orasida kuchlanish va tok qiymatlari o'lchandi;
- o'lchashlar normal ishlash rejimida va sun'iy ravishda hosil qilingan yagona nosozlik sharoitida amalga oshirildi;
- olingan natijalar standartda belgilangan ruxsat etilgan chegaraviy qiymatlar bilan solishtirildi;
- qo'shimcha ravishda elektr xavfsizligi bo'yicha sinovlar (izolyatsiya, himoya elementlari va boshqalar) o'tkazildi.

Uskuna quyidagi shartlarga javob berishi lozim:

- ochiq qismlar foydalanuvchi hayoti uchun xavf tug'dirmasligi;
- kuchlanish, tok, zaryad yoki energiya qiymatlari normativ hujjatda belgilangan maksimal darajadan oshmasligi;
- normal va nosozlik holatlarida ham elektr xavfsizligi ta'minlangan bo'lishi.

O'tkazilgan o'lchashlar natijasida ochiq qismlar orasidagi elektr kattaliklarining qiymatlari ruxsat etilgan chegaradan oshmaganligi aniqlandi. Uskuna normal ishlash rejimida ham, yagona nosozlik sharoitida ham foydalanuvchi uchun xavf tug'dirmasligi tasdiqlandi.

Sinov natijalariga ko'ra, tekshirilgan qarshilikli elektr pech (Model: KT-TF12, seriya: 25042108) elektr toki urishidan himoya bo'yicha GOCT IEC 61010-1-2014 standart talablariga to'liq javob beradi. Uskunaning ochiq qismlari xavfsiz bo'lib, ekspluatatsiya jarayonida foydalanuvchi hayoti va sog'lig'i uchun xavf tug'dirmaydi.

Izolyatsiyaning elektr chidamliligini aniqlash bo'yicha laboratoriya sinovi. Ushbu laboratoriya sinovining asosiy maqsadi – elektr uskuna izolyatsiyasining kuchlanish ta'sirida bardoshlilikini aniqlash va sinov davomida bo'shliq (havo oralig'i) yoki qattiq izolyatsiyada yorilish (proboy) yuz bermasligini tasdiqlashdan iborat. Sinov GOCT IEC 61010-1-2014 standartining 6.8.3.1 va 6.8.3.2-bandlariga muvofiq o'tkazildi.

Sinov quyidagi tartibda amalga oshirildi:

Sinov uskuna ishga tayyor holatga keltirildi va barcha normal ekspluatatsiya sharoitlari ta'minlandi.

O'zgaruvchan tok generatori yordamida izolyatsiyalangan qismlarga sinov kuchlanishi berildi. Sinov kuchlanishi minimal 500 V·A quvvat bilan ta'minlandi va signal shakli asosan sinusoidal bo'ldi. Cho'qqi (pik) va RMS qiymatlar nisbati $42 \pm 3\%$ ni tashkil qildi. Sinov kuchlanishi belgilangan qiymatgacha 5 soniya davomida teng ravishda oshirildi va belgilangan qiymat standartda ko'rsatilgan vaqt davomida ushlab turildi. Sinov jarayonida izolyatsiyada yorilish yoki bo'shliq proboyi yuz bermasligi kuzatildi.

Izolyatsiya sinovdan muvaffaqiyatli o'tgan deb hisoblanadi, agar quyidagi shartlar bajarilgan bo'lsa:

- sinov davomida bo'shliq yoki qattiq izolyatsiyada proboy yuz bermagan;
- izolyatsiya o'z funksional xususiyatlarini saqlagan;
- izolyatsiyalangan qismlar foydalanuvchi uchun xavfsiz bo'lib qolgan.

O'tkazilgan sinovlar natijasida izolyatsiyada yorilish yoki boshqa buzilishlar kuzatilmadi. Shunday qilib, izolyatsiyaning elektr chidamliligi standart talablarga to'liq javob beradi. Sinov natijalari shuni ko'rsatdiki, tekshirilgan qarshilikli elektr pech (Model: KT-TF12, seriya: 25042108) uskuna izolyatsiyaning elektr chidamliligi talablariga mos keladi va ekspluatatsiya jarayonida foydalanuvchi xavfsizligi kafolatlangan.

Izolyatsiyaning elektr chidamliligini aniqlash bo'yicha laboratoriya sinovi. Ushbu laboratoriya sinovining asosiy maqsadi – elektr uskuna izolyatsiyasining kuchlanish ta'sirida bardoshlilikini aniqlash va sinov davomida bo'shliq (havo oralig'i) yoki qattiq izolyatsiyada yorilish (proboy) yuz bermasligini

TECHNIQUE

tasdiqlashdan iborat. Sinov GOCT IEC 61010-1-2014 standartining 6.8.3.1 va 6.8.3.2-bandlariga muvofiq o'tkazildi.

Sinov quyidagicha amalga oshirildi: Sinov uskuna ishga tayyor holatga keltirildi va barcha normal ekspluatatsiya sharoitlari ta'minlandi. O'zgaruvchan tok generatori yordamida izolyatsiyalangan qismlarga sinov kuchlanishi berildi. Sinov kuchlanishi minimal 500 V·A quvvat bilan ta'minlandi va signal shakli asosan sinusoidal bo'ldi. Cho'qqi (pik) va RMS qiymatlar nisbati $42 \pm 3\%$ ni tashkil qildi. Sinov kuchlanishi belgilangan qiymatgacha 5 soniya davomida teng ravishda oshirildi va belgilangan qiymat standartda ko'rsatilgan vaqt davomida ushlab turildi. Sinov jarayonida izolyatsiyada yorilish yoki bo'shliq proboyi yuz bermasligi kuzatildi.

Izolyatsiya sinovdan muvaffaqiyatli o'tgan deb hisoblanadi, agar quyidagi shartlar bajarilgan bo'lsa:

- sinov davomida bo'shliq yoki qattiq izolyatsiyada proboy yuz bermagan;
- izolyatsiya o'z funksional xususiyatlarini saqlagan;
- izolyatsiyalangan qismlar foydalanuvchi uchun xavfsiz bo'lib qolgan.

O'tkazilgan sinovlar natijasida izolyatsiyada yorilish yoki boshqa buzilishlar kuzatilmadi. Shunday qilib, izolyatsiyaning elektr chidamliligi standart talablarga to'liq javob beradi. Sinov natijalari shuni ko'rsatdiki, tekshirilgan uskuna izolyatsiyaning elektr chidamliligi talablariga mos keladi va ekspluatatsiya jarayonida foydalanuvchi xavfsizligi kafolatlangan.

Mexanik chidamlilik (IK ta'sir sinovi) bo'yicha laboratoriya sinovi. Ushbu laboratoriya sinovi elektr uskuna va uskuna to'plamlarining normal ishlash sharoitida yuz berishi mumkin bo'lgan mexanik ta'sirlarga chidamliligini baholashga qaratilgan. Sinovning asosiy talabi shundan iboratki, uskuna mexanik ta'sir natijasida foydalanuvchiga xavf tug'dirmasligi kerak.

Normal mexanik energiya darajasi: 5 J

Ruxsat etilgan minimal energiya: 1 J (agar ishlab chiqaruvchi tomonidan xavf baholash amalga oshirilgan bo'lsa).

Uskuna qattiq tekis yuzaga o'rnatiladi. 30 N kuch yarimshar shaklidagi, 12 mm diametrli tayoq bilan uskuna foydalanuvchi uchun ochiq qismlariga tatbiq etildi. Sinov korpusning barcha ochiq qismlariga, shu jumladan, portativ uskuna pastki elementlariga tatbiq etildi. Sinovdan oldin uskuna elektr manbayidan uziladi va ishlash holatida bo'lmaydi.

Zarba sinovi. Statik bo'lmagan, qo'l uskunasi bo'lmagan yoki tarmoq vilkali uskuna uchun tatbiq etiladi. Zarba energiyasi IK kodi yoki IEC 62262 ga muvofiq Eha/Ehc metodlari orqali amalga oshirildi;

Uskunaning ishlash holatida bo'lmashligi shart, 100 kg dan yengil uskuna uchun amalga oshiriladi. Uskuna ishlash holatida bo'lmashligi lozim. Laboratoriya sinovi shuni ko'rsatdiki, tekshirilgan uskuna mexanik ta'sirlarga chidamli va normal ishlash sharoitida foydalanuvchi uchun xavfsiz. Statik va zarba sinovlari davomida uskuna ishlashga ta'sir qilmagan va xavf yoki shikastlanishlar aniqlanmagan. Izolyatsiya, korpus va xavfsizlik tizimlari sinov talablariga mos keladi.

Sinov natijalari (namuna jadval)

Parametr	Talablar	O'lchangan natija	Xulosa
Siljish va egilish	Siljish yoki egilish bo'lmashligi	Siljish kuzatilmadi	Mos keldi
Korpusning zarba chidamliligi	Nominal zarba energiyasidan yuqori zarar bo'lmashligi	Hech qanday shikastlanish yo'q	Mos keldi
Foydalanuvchiga xavf	Mexanik ta'sir natijasida ochiq qismlar xavfli bo'lmashligi	Xavf aniqlanmadi	Mos keldi

Xulosa. Ushbu tadqiqot natijalari qarshilikli elektr pech KT-TF12 ning GOCT IEC 61010-1-2014 standartlariga to'liq javob berishini ko'rsatdi. Pechning maksimal nominal quvvati va kirish toki, markirovkasi, izolyatsiyasi va mexanik chidamliligi laboratoriya sinovlari orqali tasdiqlandi. Sinovlar pechning normal ishlash va yagona nosozlik holatlarida foydalanuvchi uchun xavfsizligini, barqaror ishlashini va uzoq muddatli foydalanishda funksiyalarini yo'qotmasligini ko'rsatdi. Shu bilan birga tadqiqot natijalari pechning sanoat va ilmiy-amaliy ishlatish uchun ishonchli va xavfsiz ekanligini ilmiy asosda tasdiqlaydi.

ADABIYOTLAR:

1. GOCT IEC 61010-1-2014. Измерительное, лабораторное и контрольное оборудование. Общие требования безопасности.

2. IEC 62262: 2002. *Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts (IK code).*
3. IEC 60068-2-75: *Environmental testing – Part 2-75: Test Eh – Hammer tests.*
4. Дьяков В.Н. *Электробезопасность и защита оборудования.* Москва, 2018.
5. Иванов С.П. *Лабораторные испытания электрических приборов.* Санкт-Петербург, 2017.
6. ГОСТ 12.2.007.0-75. *Электробезопасность. Общие требования.*
7. IEC 61010-2-010: *Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use – Part 2-010: Particular requirements for laboratory equipment for mixing and stirring.*
8. Петров А.А., Сидоров Б.В. *Методы испытаний электрических приборов.* Москва, 2016.
9. IEC 61010-2-020: *Safety requirements for laboratory equipment for heating and cooling.*
10. Лазарев И.И. *Испытания и сертификация электротехнических изделий.* Москва, 2019.